



UNIVERSITÀ DI PISA

Scuola di Ingegneria

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA, DEI  
SISTEMI, DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

# **Analisi Termica di un Convertitore Termoionico per Energia Solare Concentrata**

Relatori

Dott. Ing. Marco Antonelli

Dott. Ing. Daniele M. Trucchi

Candidata

Ilaria Vivaldi

Anno Accademico 2015/2016

*A nonna Anna  
e ai miei genitori*

## Sommario

Il presente studio si occupa dell'analisi termica di un convertitore solare termoionico e termoelettrico in condizioni operative. Il dispositivo converte direttamente energia concentrata solare in energia elettrica e termica utilizzando un termoionico e una fase termoelettrica termicamente combinati in serie.

Il comportamento termico del dispositivo sotto diversa intensità della radiazione solare concentrata è stato simulato numericamente mediante il programma di fluidodinamica computazionale Fluent. Un'analisi preliminare con Ansys Steady State Thermal è stata condotta per inizializzare la simulazione Fluent.

Lo studio è iniziato dall'analisi dei fenomeni critici che influiscono sulle prestazioni del dispositivo, ovvero gli effetti della carica spaziale. Un componente importante del convertitore termoionico, in grado di minimizzare gli effetti di carica spaziale, è risultato essere il distanziatore interelettrodico. Quattro geometrie di distanziatori interelettrodici, diverse in spessore e configurazione (singolo distanziale anulare o omogeneamente distribuiti piccoli distanziatori), sono state investigate per prevedere il comportamento del convertitore in termini di temperatura, flussi di calore, flussi elettronici e densità di corrente.

Dall'analisi dei risultati è emerso che i migliori risultati sono stati ottenuti posizionando un distanziatore di 10  $\mu\text{m}$  di spessore nella zona periferica degli elettrodi termoionici, mentre i peggiori sono stati ottenuti con distanziatori uniformemente distribuiti sulla superficie del collettore. Una geometria alternativa costituita da una quantità discreta di distanziatori distribuiti nella zona periferica è stata proposta come la soluzione più efficace.

## **Abstract**

The present work deals with the thermal analysis of a thermionic and thermoelectric solar converter under operating conditions. The device converts directly solar concentrated energy into electrical and thermal energy by using a thermionic and a thermoelectric stage thermally combined in series.

The thermal behavior of the device under different solar concentrated radiation intensity was numerically simulated by means of the computational fluid dynamic software Fluent. A preliminary analysis with Ansys Steady State Thermal was performed to initialize Fluent simulation.

The study started from the analysis of the critical phenomena which affect the device's performance, namely space charge effects. An important component of the thermionic converter, able to minimize space charge effects, was found to be the inter-electrode spacer.

Four different inter-electrode spacer geometries, differing in thickness and configuration (single ring-shaped spacer or homogeneously distributed small spacers), were investigated to predict the converter behavior in terms of temperature, heat fluxes, electronic fluxes and current density.

From the analysis of the results, it came out that the best results were obtained by positioning a spacer of 10  $\mu\text{m}$  thickness in the peripheral zone of the thermionic electrodes, while the worst were obtained with spacers evenly distributed on the collector surface. Another trade-off alternative consisting of a discrete amount of spacers distributed in the peripheral zone was proposed as the most effective solution.



## Indice

<b>Introduzione</b> .....	18
<b>Capitolo 2: Sistemi per la conversione dell'energia solare</b> .....	23
2.1 Sistemi a radiazione solare concentrata: stato dell'arte .....	23
2.2 Convertitori Termoionici .....	27
<b>Capitolo 3: Principi della conversione Termoionica e Termoelettrica</b> .....	30
3.1 Principi di base della conversione termoionica .....	30
3.2 Effetti di carica spaziale nel convertitore termoionico .....	35
3.3 Principi di base della conversione termoelettrica .....	37
<b>Capitolo 4: Dispositivo di Conversione</b> .....	40
4.1 Descrizione del dispositivo di conversione .....	40
4.2 Prestazioni e test preliminari.....	47
<b>Capitolo 5: Equazione di Bilancio per lo scambio termico</b> .....	50
<b>Capitolo 6: Simulazione Numerica</b> .....	56
6.1 Metodologia .....	56
6.2 Impostazione della simulazione numerica .....	56
6.2.1 Realizzazione CAD.....	56
6.2.2 Geometria.....	58
6.2.3 Realizzazione della Mesh .....	59
6.2.4 Definizione dei materiali .....	63
6.2.5 Steady State Thermal .....	64
6.2.6 Ansys Fluent .....	68
6.3 Analisi di sensibilità dalla mesh .....	72
6.4 Casi analizzati .....	72
6.4.1 Distanziatore ad anello da 100 $\mu\text{m}$ .....	72
6.4.2 Distanziatore ad anello da 10 $\mu\text{m}$ .....	75
6.4.3 Maschera da 10 $\mu\text{m}$ .....	76
6.4.4 Distanziatori da 10 $\mu\text{m}$ .....	79
<b>Capitolo 7: Discussione dei risultati</b> .....	82
7.1 Anello da 100 $\mu\text{m}$ .....	82
7.2 Anello da 10 $\mu\text{m}$ .....	113
7.3 Maschera da 10 $\mu\text{m}$ .....	142
7.4 Distanziatori da 10 $\mu\text{m}$ .....	172

<b>7.5 Confronto tra casi</b> .....	202
<b>Capitolo 8: Conclusioni</b> .....	214
<b>Bibliografia</b> .....	215
<b>Ringraziamenti</b> .....	217

## Indice delle Figure

### Capitolo 1

Figura 1. 1 Costante solare e dati geometrici principali della Terra e del Sole .....	21
Figura 1. 2 Confronto tra lo spettro del corpo nero e lo spettro del Sole (sopra), lunghezza d'onda prevalente del corpo nero (sotto) .....	22

### Capitolo 3

Figura 3. 1 Andamento dell'electron motive all'interfaccia tra metallo e vapore .....	31
Figura 3. 2 Electron motive all'interfaccia metallo-vapore in presenza di un campo elettrico applicato esternamente .....	32
Figura 3. 3 Schema di un convertitore termoionico .....	33
Figura 3. 4 Interelectrode motive in condizione di trasporto ideale delle particelle .....	33
Figura 3. 5 Interelectrode motive per differenti valori della tensione di uscita.....	35
Figura 3. 6 Caratteristica della potenza ideale in uscita .....	35
Figura 3. 7 Diagramma dell'energia del processo di conversione: $E_{F,E}$ ed $E_{F,C}$ sono i livelli di Fermi dell'emettitore e del collettore; $\phi_E$ e $\phi_C$ sono le funzioni lavoro dei due elettrodi e $\phi_{ME}$ e $\phi_{MC}$ sono le barriere di potenziale aggiuntive; $V_0$ è la differenza di voltaggio tra i due elettrodi e $-q$ è la carica dell'elettrone.....	36

### Capitolo 4

Figura 4. 1 Schema della struttura del modulo di conversione: (1) Assorbitore; (2) Emettitore termoionico; (3) Spazio interelettrodico < 1mm; (4) Collettore termoionico; (5) Strato elettricamente isolante e termicamente conduttivo; (6) convertitore termoelettrico; (7) Strato elettricamente isolante e termicamente conduttivo; (8) dissipatore di calore. ....	40
Figura 4. 2 Elementi che costituiscono la versione Beta: (1) Corpo di Flangia DN63CF; (2) Dissipatore di calore; (3) ghiera di molibdeno; (4) Assorbitore e distanziatore ad anello; (5) Collettore; (6) Barre di rame e viti di molibdeno con cilindri isolanti per connessione elettrica con il modulo termoionico; (7) Modulo termoelettrico (8) Elementi di supporto, saldatura e chiusura .....	41
Figura 4. 3 Dissipatore fissato alla flangia .....	42
Figura 4. 4 Flangia di supporto per la finestra (sinistra); Spettro di trasmissione del quarzo (destra).....	42
Figura 4. 5 Corpo di Flangia: vista frontale .....	43
Figura 4. 6 Corpo di flangia: vista laterale .....	43
Figura 4. 7 Vista sui connettori .....	44

Figura 4. 8 Ghiera di molibdeno: vista frontale (sinistra) e posteriore (destra) .....	44
Figura 4. 9 Assorbitore di Carburo di Afnio .....	46
Figura 4. 10 Anello distanziatore di allumina .....	46
Figura 4. 11 Modulo termoelettrico.....	47
Figura 4. 12 Temperatura dell'assorbitore e efficienza del modulo termoionico in funzione della temperatura del collettore, per un flusso incidente pari a $350 \text{ kW/m}^2$ .....	48
Figura 4. 13 Potenza ed efficienza relative al modulo termoionico (sinistra); potenza ed efficienza relative a modulo termoionico più termoelettrico.....	48

## Capitolo 5

Figura 5. 1 In alto, componenti principali del dispositivo di conversione; In basso, andamento della temperatura come funzione della posizione lungo l'asse longitudinale. .. 50

## Capitolo 6

Figura 6. 1 Dispositivo di conversione: a) vista frontale; b) vista posteriore c) vista laterale .....	57
Figura 6. 2 Parte attiva del dispositivo composta da ghiera di molibdeno, assorbitore, distanziatore, collettore e modulo termoelettrico: a) vista frontale; b) vista posteriore c) vista laterale.....	57
Figura 6. 3 Versione esplosa del dispositivo: (1) Dissipatore; (2) Finestra; (3) Flangia di supporto per la finestra ; (4) Ghiera di molibdeno; (5) Assorbitore-Emettitore; (6) Anello distanziatore; (7) Collettore; (8) Modulo termoelettrico; (9) Corpo di flangia; (10) Connettori .....	58
Figura 6. 4 Esempio di schermata di Geometry in Ansys Workbench .....	59
Figura 6. 5 Opzioni relative al metodo di mesh Sweep.....	60
Figura 6. 6 Mesh relativa all'intero dispositivo: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra).....	60
Figura 6. 7 Mesh relativa al dissipatore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra). 60	
Figura 6. 8 Mesh relativa alla Flangia di supporto per la finestra : vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra) .....	61
Figura 6. 9 Mesh relativa al corpo di flangia: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra). .....	61
Figura 6. 10 Mesh relativa all'acqua fluente nei due dissipatori .....	61
Figura 6. 11 Mesh relativa alla ghiera di molibdeno: vista frontale (sopra), vista posteriore (sotto).....	61
Figura 6. 12 Mesh relativa al modulo termoionico del convertitore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra) .....	62
Figura 6. 13 Mesh relativa al modulo termoelettrico del convertitore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra) .....	62
Figura 6. 14 Mesh relativa al vuoto presente nel dispositivo: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra).....	62
Figura 6. 15 Mesh relativa al vuoto interelettrodico: vista frontale (sinistra), vista laterale (destra).....	62

Figura 6. 16 Andamento dell'emissività del carbuto di afnio con la temperatura .....	63
Figura 6. 17 Schema di superfici radianti .....	66
Figura 6. 18 Emicubo .....	66
Figura 6. 19 Ottenimento dei delta di fattori di vista per il Metodo dell'Emicubo.....	67
Figura 6. 20 Condizioni al contorno per l'acqua all'interno degli scambiatori.....	71
Figura 6. 21 Assorbitore vista frontale (sinistra) e posteriore (destra) .....	73
Figura 6. 22 Collettore vista frontale (sinistra) e posteriore (destra).....	73
Figura 6. 23 Distanziatore a forma di anello vista frontale (sinistra) e laterale (destra) .....	73
Figura 6. 24 Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	74
Figura 6. 25 Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra).....	74
Figura 6. 26 Distanziatore meshato vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra).....	74
Figura 6. 27 Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	76
Figura 6. 28 Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra).....	76
Figura 6. 29 Distanziatore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	76
Figura 6. 30 Assorbitore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	77
Figura 6. 31 Collettore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	77
Figura 6. 32 Distanziatori vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra).....	78
Figura 6. 33 Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	78
Figura 6. 34 Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra).....	78
Figura 6. 35 Distanziatori meshati vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra) .....	79
Figura 6. 36 Schema del processo di deposizione per polverizzazione.....	79
Figura 6. 37 Assorbitore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	80
Figura 6. 38 Collettore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	80
Figura 6. 39 Distanziatori vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra).....	80
Figura 6. 40 Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra) .....	80
Figura 6. 41 Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra).....	81
Figura 6. 42 Distanziatori meshati vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra) .....	81

## Capitolo 7

Figura 7. 1 Sezione del dispositivo.....	82
Figura 7. 2 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	83
Figura 7. 3 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli ..	83
Figura 7. 4 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli	84
Figura 7. 5 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli	84
Figura 7. 6 Distribuzione della temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli.....	84
Figura 7. 7 Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli	85
Figura 7. 8 Distribuzione della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli ..	85
Figura 7. 9 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	85
Figura 7. 10 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli .....	86

Figura 7. 11 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli .....	86
Figura 7. 12 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	86
Figura 7. 13 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	87
Figura 7. 14 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli ...	87
Figura 7. 15 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli ....	87
Figura 7. 16 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	89
Figura 7. 17 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli	89
Figura 7. 18 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli .....	89
Figura 7. 19 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	90
Figura 7. 20 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	90
Figura 7. 21 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	91
Figura 7. 22 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli .....	91
Figura 7. 23 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli .....	92
Figura 7. 24 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	92
Figura 7. 25 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	92
Figura 7. 26 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli ...	93
Figura 7. 27 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli ....	93
Figura 7. 28 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	94
Figura 7. 29 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli	95
Figura 7. 30 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli .....	95
Figura 7. 31 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	95
Figura 7. 32 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	96
Figura 7. 33 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	97
Figura 7. 34 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=500 soli .....	97
Figura 7. 35 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli .....	97
Figura 7. 36 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	98
Figura 7. 37 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	98
Figura 7. 38 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli ...	98

Figura 7. 39 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli ....	99
Figura 7. 40 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	100
Figura 7. 41 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli .....	100
Figura 7. 42 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli .....	101
Figura 7. 43 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	101
Figura 7. 44 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	101
Figura 7. 45 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	102
Figura 7. 46 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli .....	102
Figura 7. 47 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=600 soli .....	103
Figura 7. 48 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	103
Figura 7. 49 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	103
Figura 7. 50 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli .	104
Figura 7. 51 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli .	104
Figura 7. 52 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	105
Figura 7. 53 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli .....	106
Figura 7. 54 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli .....	106
Figura 7. 55 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	106
Figura 7. 56 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	107
Figura 7. 57 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	107
Figura 7. 58 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli .....	108
Figura 7. 59 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli .....	108
Figura 7. 60 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	108
Figura 7. 61 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	109
Figura 7. 62 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli	109
Figura 7. 63 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli	109
Figura 7. 64 Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termoelettrico.....	111

Figura 7. 65 Andamento della perdite di potenza termica scambiata dall'assorbitore-emettitore con ghiera, finestra e flangia .....	111
Figura 7. 66 Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione.....	111
Figura 7. 67 Andamento della potenza prodotta dal modulo termoelettrico al variare del fattore di concentrazione della radiazione .....	112
Figura 7. 68 Andamento temperature nel modulo termoelettrico .....	112
Figura 7. 69 Andamento potenza prodotta dal modulo termoelettrico.....	112
Figura 7. 70 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	113
Figura 7. 71 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli .....	113
Figura 7. 72 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli .....	114
Figura 7. 73 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	114
Figura 7. 74 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	115
Figura 7. 75 Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli .....	115
Figura 7. 76 Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli	115
Figura 7. 77 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	116
Figura 7. 78 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli .....	116
Figura 7. 79 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli .....	117
Figura 7. 80 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	117
Figura 7. 81 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	117
Figura 7. 82 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli	118
Figura 7. 83 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli .	118
Figura 7. 84 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	120
Figura 7. 85 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli .....	120
Figura 7. 86 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli .....	120
Figura 7. 87 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	121
Figura 7. 88 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	121
Figura 7. 89 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	121
Figura 7. 90 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli .....	122

Figura 7. 91 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli .....	122
Figura 7. 92 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	122
Figura 7. 93 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	123
Figura 7. 94 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli ..	123
Figura 7. 95 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli ..	123
Figura 7. 96 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	125
Figura 7. 97 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli .....	125
Figura 7. 98 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli .....	125
Figura 7. 99 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	126
Figura 7. 100 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	126
Figura 7. 101 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	127
Figura 7. 102 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=500 soli .....	127
Figura 7. 103 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli .....	128
Figura 7. 104 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	128
Figura 7. 105 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	128
Figura 7. 106 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli	129
Figura 7. 107 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli	129
Figura 7. 108 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	130
Figura 7. 109 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli .....	131
Figura 7. 110 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli .....	131
Figura 7. 111 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	131
Figura 7. 112 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	132
Figura 7. 113 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	132
Figura 7. 114 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli .....	133
Figura 7. 115 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=600 soli .....	133
Figura 7. 116 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	133



Figura 7. 117 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	134
Figura 7. 118 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli	134
Figura 7. 119 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli	134
Figura 7. 120 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	136
Figura 7. 121 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli .....	136
Figura 7. 122 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli .....	136
Figura 7. 123 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	137
Figura 7. 124 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	137
Figura 7. 125 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	138
Figura 7. 126 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli .....	138
Figura 7. 127 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli .....	138
Figura 7. 128 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	139
Figura 7. 129 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	139
Figura 7. 130 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli	139
Figura 7. 131 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli	140
<b>Figura 7. 132</b> Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termoionico.....	141
Figura 7. 133 Andamento della percentuale di potenza termica scambiata dall'assorbitore con ghiera, finestra, Flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia .....	141
Figura 7. 134 Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione.....	142
Figura 7. 135 Andamento temperature nel modulo termoelettrico .....	142
Figura 7. 136 Andamento della potenza prodotta dal modulo termoionico e termoelettrico al variare del fattore di concentrazione della radiazione .....	142
Figura 7. 137 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	143
Figura 7. 138 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli .....	143
Figura 7. 139 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli .....	144
Figura 7. 140 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	144
Figura 7. 141 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	144
Figura 7. 142 Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli .....	145

Figura 7. 143 Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli .....	145
Figura 7. 144 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	146
Figura 7. 145 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli .....	146
Figura 7. 146 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli .....	146
Figura 7. 147 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	147
Figura 7. 148 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	147
Figura 7. 149 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli .....	148
Figura 7. 150 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli .....	148
Figura 7. 151 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	149
Figura 7. 152 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli .....	149
Figura 7. 153 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli .....	150
Figura 7. 154 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	150
Figura 7. 155 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	151
Figura 7. 156 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	151
Figura 7. 157 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli .....	152
Figura 7. 158 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli .....	152
Figura 7. 159 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	152
Figura 7. 160 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	153
Figura 7. 161 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli .....	153
Figura 7. 162 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli .....	153
Figura 7. 163 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	154
Figura 7. 164 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli .....	155
Figura 7. 165 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli .....	155
Figura 7. 166 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	155
Figura 7. 167 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	156

Figura 7. 168 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	157
Figura 7. 169 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=500 soli .....	157
Figura 7. 170 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli .....	157
Figura 7. 171 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	158
Figura 7. 172 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	158
Figura 7. 173 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli .....	158
Figura 7. 174 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli .....	159
Figura 7. 175 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	160
Figura 7. 176 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli .....	160
Figura 7. 177 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli .....	160
Figura 7. 178 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	161
Figura 7. 179 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	161
Figura 7. 180 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	162
Figura 7. 181 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli .....	162
Figura 7. 182 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=600 soli .....	163
Figura 7. 183 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	163
Figura 7. 184 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	163
Figura 7. 185 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli .....	164
Figura 7. 186 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli .....	164
Figura 7. 187 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	165
Figura 7. 188 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli .....	165
Figura 7. 189 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli .....	166
Figura 7. 190 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	166
Figura 7. 191 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	166
Figura 7. 192 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	167

Figura 7. 193 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli .....	168
Figura 7. 194 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli .....	168
Figura 7. 195 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	168
Figura 7. 196 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	169
Figura 7. 197 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli .....	169
Figura 7. 198 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli .....	169
Figura 7. 199 Andamenti delle temperature medie nel modulo termoionico .....	170
Figura 7. 200 Andamento differenza di temperatura nel modulo termoionico e della potenza termica scambiata dall'assorbitore con ghiera, finestra e flangia .....	171
Figura 7. 201 Andamento della densità di corrente prodotta dal modulo termoionico al variare del fattore di concentrazione .....	171
Figura 7. 202 Andamento temperature nel modulo termoelettrico .....	171
Figura 7. 203 Andamento della potenza prodotta dal modulo termoelettrico .....	172
Figura 7. 204 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	173
Figura 7. 205 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli .....	173
Figura 7. 206 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli .....	173
Figura 7. 207 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	174
Figura 7. 208 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	174
Figura 7. 209 Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli .....	174
Figura 7. 210 Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli .....	175
Figura 7. 211 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli .....	176
Figura 7. 212 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli .....	176
Figura 7. 213 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli .....	176
Figura 7. 214 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli .....	177
Figura 7. 215 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli .....	177
Figura 7. 216 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli .....	177
Figura 7. 217 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli .....	178

Figura 7. 218 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	179
Figura 7. 219 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli .....	179
Figura 7. 220 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli .....	179
Figura 7. 221 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	180
Figura 7. 222 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	180
Figura 7. 223 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli .....	181
Figura 7. 224 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli .....	181
Figura 7. 225 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli .....	182
Figura 7. 226 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli .....	182
Figura 7. 227 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli .....	182
Figura 7. 228 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli	183
Figura 7. 229 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli	183
Figura 7. 230 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	184
Figura 7. 231 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli .....	185
Figura 7. 232 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli .....	185
Figura 7. 233 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	185
Figura 7. 234 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	186
Figura 7. 235 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli .....	186
Figura 7. 236 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=500 soli .....	187
Figura 7. 237 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli .....	187
Figura 7. 238 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli .....	187
Figura 7. 239 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli .....	188
Figura 7. 240 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli .....	188
Figura 7. 241 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli	188
Figura 7. 242 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	190

Figura 7. 243 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli .....	190
Figura 7. 244 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli .....	190
Figura 7. 245 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	191
Figura 7. 246 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	191
Figura 7. 247 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli .....	192
Figura 7. 248 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli .....	192
Figura 7. 249 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=600 soli .....	192
Figura 7. 250 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli .....	193
Figura 7. 251 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli .....	193
Figura 7. 252 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C= 600 soli .....	193
Figura 7. 253 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli	194
Figura 7. 254 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	195
Figura 7. 255 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli .....	195
Figura 7. 256 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli .....	196
Figura 7. 257 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	196
Figura 7. 258 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	196
Figura 7. 259 Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli .....	197
Figura 7. 260 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli .....	197
Figura 7. 261 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli .....	198
Figura 7. 262 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli .....	198
Figura 7. 263 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli .....	198
Figura 7. 264 Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli .....	199
Figura 7. 265 Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli	199
Figura 7. 266 Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termoionico.....	200
Figura 7. 267 Andamenti della potenza scambiata dall'emettitore con ghiera, finestra e flangia. ....	200

Figura 7. 268	Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione.....	201
Figura 7. 269	Andamento della potenza prodotta dal modulo termoionico e termoelettrico al variare del fattore di concentrazione della radiazione .....	201
Figura 7. 270	Andamento temperature nel modulo termoelettrico .....	201
Figura 7. 271	Confronto tra temperature medie della superficie emettente casi con anello da 100 $\mu$ m e 10 $\mu$ m .....	202
Figura 7. 272	Confronto tra temperature medie della superficie attiva del collettore casi con anello da 100 $\mu$ m e 10 $\mu$ m .....	203
Figura 7. 273	Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=300 soli .....	203
Figura 7. 274	Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=400 soli .....	204
Figura 7. 275	Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=500 soli .....	204
Figura 7. 276	Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=600 soli .....	205
Figura 7. 277	Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=700 soli .....	205
Figura 7. 278	Confronto tra temperature medie dell'emettitore nei casi con anello e maschera da 10 $\mu$ m.....	207
Figura 7. 279	Confronto tra temperature medie del collettore nei casi con anello e maschera da 10 $\mu$ m.....	207
Figura 7. 280	Confronto tra temperature medie dell'emettitore nei casi con anello e distanziatori da 10 $\mu$ m .....	208
Figura 7. 281	Confronto tra temperature medie del collettore nei casi con anello e distanziatori da 10 $\mu$ m .....	209
<b>Figura 7. 282</b>	Confronto tra differenza di temperature degli elettrodi del modulo termoionico.....	210
Figura 7. 283	Confronto tra temperature medie dell'emettitore.....	210
<b>Figura 7. 284</b>	Confronto tra temperature medie del collettore .....	211
Figura 7. 285	Confronto tra densità di corrente prodotte dal modulo termoionico.....	211
Figura 7. 286	Confronto potenze elettriche prodotte dal modulo termoionico .....	212
Figura 7. 287	Confronto potenze elettriche prodotte dal modulo termoelettrico .....	212

## Introduzione

Di fronte alla continua crescita del costo del petrolio e all'inevitabile esaurimento delle scorte di energia non rinnovabile previsto in un futuro non troppo remoto, negli ultimi anni la ricerca si è fortemente focalizzata sullo sviluppo di nuovi fonti di energia rinnovabile e sul miglioramento dell'efficienza dei processi coinvolti nei dispositivi per la conversione di energia.

Una delle definizioni più ampiamente accettate di sviluppo sostenibile è quella di fattore *“che soddisfa i bisogni del presente, senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri”*; un suo aspetto fondamentale è sicuramente l'energia, la quale influenza l'evoluzione della società e l'andamento economico della stessa. Tuttavia la dipendenza dai combustibili fossili sta mettendo a rischio la salute dell'ambiente e quella delle persone. Allo stesso tempo, l'emancipazione da fonti energetiche soggette a monopolio rappresenta sempre di più un fattore imprescindibile per assicurare la continuità e l'indipendenza di un Paese. A questo proposito, le risorse energetiche da fonti rinnovabili sembrano essere una delle soluzioni più efficienti ed efficaci; difatti, F. Shuman definì all'inizio del Novecento la radiazione solare come: *“la più razionale fonte di energia”*, in quanto tutte le forme di energia nel mondo, come noi le conosciamo, sono di origine solare: essa viene emessa dal Sole nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica, consente la vita sulla Terra, attiva i principali meccanismi che ne stanno alla base, nonché regola il clima e la maggior parte dei fenomeni meteorologici.

Ciononostante occorre che la radiazione solare sia raccolta da aree molto vaste per ottenere quantità di energia rilevanti, poiché la stessa è poco intensa. Inoltre, gli attuali sistemi di conversione sono caratterizzati da efficienze di conversione limitate: i sistemi fotovoltaici estesi raggiungono il 15% di efficienza in condizioni operative reali, mentre in laboratorio circa il 23%, valore in ogni caso lontano da un funzionamento ideale. Inoltre, tali prodotti tecnologici sono caratterizzati da un costo di produzione non trascurabile. Questi fattori combinati rendono l'energia prodotta da conversione solare notevolmente (da 2 a 4 volte) più dispendiosa di quella prodotta da idrocarburi fossili.

Rispetto alla tecnologia del fotovoltaico esteso, i sistemi a concentrazione solare sono connessi ad alcuni vantaggi potenziali: 1) un minor costo di produzione della superficie captante rispetto al fotovoltaico; 2) temperature operative elevate, che consentono efficienze elevate, altri tipi di applicazioni rispetto alla semplice conversione di energia (e.g. reattori chimici solari), cogenerazione termica e, soprattutto, la capacità di alimentare sistemi di immagazzinamento dell'energia, fondamentali per soddisfare le esigenze della rete elettrica a partire da una sorgente di energia intermittente come il sole.

In questo ambito, a metà strada tra le tecnologie del fotovoltaico a concentrazione e del termodinamico a concentrazione, si innesta lo sviluppo di un sistema a stato solido, come le normali celle solari, ma capace di operare ad alta temperatura come i sistemi termodinamici. Questa tecnologia proposta dall'Istituto di Struttura della Materia (ISM) del CNR deriva dalla combinazione tra meccanismi di generazione termoionici e termoelettrici e lo sviluppo dei relativi materiali ottimizzati, il cui interesse ed aspirazione sono quelli di creare un dispositivo innovativo con componenti scalabili per energia solare a concentrazione avente le seguenti caratteristiche:

- Generare con efficienza energia elettrica e termica;
- Operare in modo affidabile alle alte temperature (tra 700 e 900 °C);
- Recuperare e sfruttare calore a temperatura intermedia.

In questo contesto, la presente attività di tesi è sviluppata nell'ambito di una collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Energetica dell'Università di Pisa e l'ISM e il suo scopo



principale è quello di condurre un'analisi termica del dispositivo di conversione in modo da risolvere alcune problematiche, principalmente effetti di carica spaziale, che in fase di test preliminari hanno fortemente penalizzato le prestazioni del dispositivo.

Per tale analisi è stato necessario realizzare un modello CAD del dispositivo e sfruttare il software ANSYS 15.0 per condurre simulazioni del convertitore in diverse condizioni di flusso termico entrante. Si è condotta un'analisi preliminare con il programma Steady State Thermal del pacchetto Ansys i cui risultati sono stati utilizzati per inizializzare la successiva analisi su Fluent.

Un importante componente del modulo termoionico, in grado di minimizzare gli effetti di carica spaziale, è il distanziatore interelettrodo.

Quattro geometrie del distanziatore, differenti in spessore e forma, sono state realizzate per valutare il comportamento del dispositivo in termini di temperature, flussi termici, flussi elettronici e densità di corrente.

## Capitolo 1: La Radiazione Solare

Il Sole emette luce in un ampio intervallo di lunghezze d'onda, di cui l'occhio umano percepisce solo la frazione visibile. Nel 1900, M. Planck risolse le discrepanze tra le osservazioni sperimentali sullo spettro della radiazione elettromagnetica in equilibrio termico, e la teoria classica del fenomeno, introducendo il concetto di quanto di energia.

L'intensità della radiazione di un corpo nero alla temperatura  $T$  è data dalla legge della radiazione di Planck:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

dove:

- $I(\nu, T)$  è l'energia irradiata da un corpo nero a temperatura  $T$ , emessa per unità di area normale alla direzione considerata, per ogni intervallo di frequenza ed unità di angolo solido;
- $h$  è la costante di Plank;
- $c$  è la velocità della luce nel vuoto;
- $k$  è la costante di Boltzmann;
- $\nu$  è la frequenza della radiazione elettromagnetica;
- $T$  è la temperatura del corpo espressa in Kelvin.

È importante evidenziare come la lunghezza d'onda, alla quale l'intensità della radiazione emessa dal corpo nero è massima, sia data dalla legge di Wien, Eq. (2):

$$\lambda_{max} T = cost = 2898 \mu m \cdot K \quad (2)$$

Invece a potenza totale emessa per unità di superficie, è data dalla legge di Stefan-Boltzmann, Eq.(3):

$$I = \sigma T^4 \quad (3)$$

con:

- $\lambda$  lunghezza d'onda della radiazione;
- $\sigma$  costante di Stefan-Boltzmann.

Entrambe queste leggi sono deducibili dalla legge della radiazione di Planck; la prima, cercandone il massimo in funzione della lunghezza d'onda, la seconda mediante integrazione su tutte le frequenze e sull'angolo solido.

L'energia media, che il Sole irraggia nell'unità di tempo su una superficie unitaria posta all'esterno dell'atmosfera terrestre ed orientata perpendicolarmente ai raggi solari, viene denominata costante solare  $I_{cs}$ , Figura 1. 1. Il suo valore più recente, misurato attraverso satelliti artificiali, risulta pari a  $1367 \text{ W/m}^2$ .

Si può fare l'ipotesi che il Sole si comporti, ai fini dell'irraggiamento, come un corpo nero a temperatura uniforme; se lo suddividiamo in vari gusci di spessore arbitrario, ognuno con una temperatura costante, possiamo dire che ogni guscio, indipendentemente dall'altro, si trova all'equilibrio termico. Difatti, ciascun guscio assorbe tanta energia quanta ne emette, conseguendone che la temperatura resta costante.

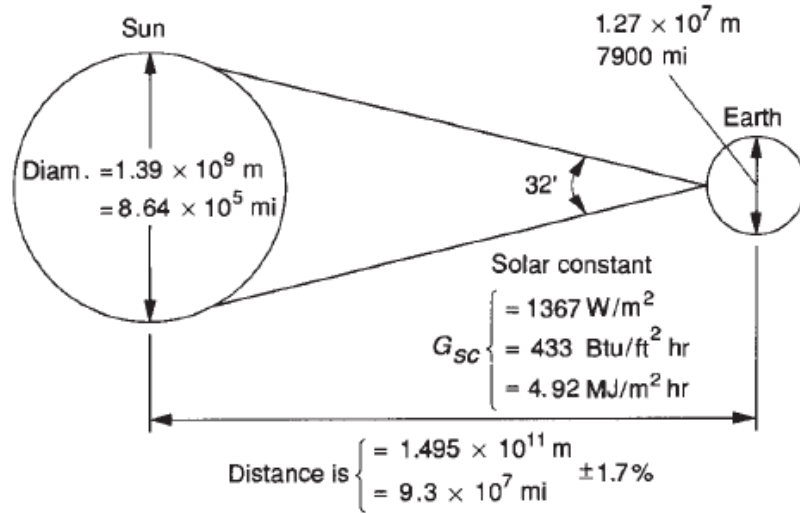
Utilizzando la legge di Stefan-Boltzmann (1.3), è possibile valutare facilmente la temperatura di tale corpo nero equivalente.

Il **flusso solare**  $\Phi_s$  sulla superficie esterna del Sole, risulta pari a:

$$\Phi_s = I_{cs} \left( \frac{d}{R} \right)^2 = 63.253 \frac{kW}{m^2} \quad (4)$$

Dove:

- $d$  è la distanza media Terra-Sole;
- $R$  è il raggio solare.



**Figura 1. 1** Costante solare e dati geometrici principali della Terra e del Sole

La **temperatura del Sole**  $T_s$  è pari a:

$$T_s = \left( \frac{\Phi_s}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \cong 5779 \text{ K} \quad (5)$$

Utilizzando la legge di Wien, comprendiamo come la lunghezza massima dello spettro solare sia:

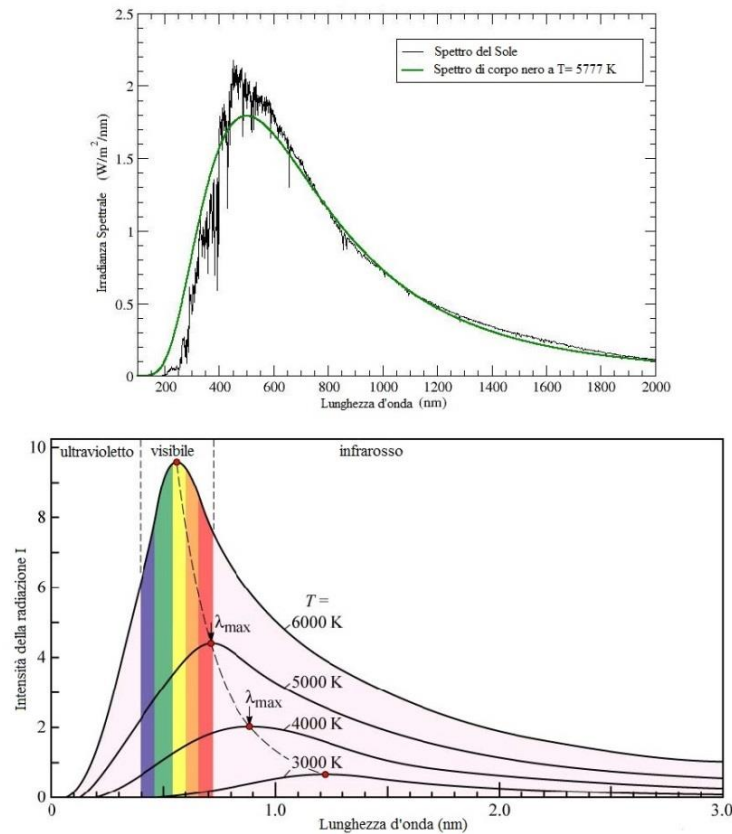
$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T_s} \cong 500 \text{ nm} \quad (6)$$

In figura [1.4] è rappresentato lo spettro del corpo nero alla temperatura trovata e la lunghezza d'onda prevalente a questa temperatura.

La distribuzione spettrale dell'irraggiamento extraterrestre risulta così suddivisa:

	ultravioletto	visibile	infrarosso
frazione di energia	0.064	0.480	0.456
energia nell'intervallo (W/m <sup>2</sup> )	88	656	623

Poiché la Terra si trova a circa 150 milioni di chilometri dal Sole, riceve solo una piccola frazione di tale energia; infatti, il Sole offre più energia in un quarto d'ora di quanta l'uomo ne usi in un anno, tuttavia della medesima solo una piccola frazione ( $1.73 \cdot 10^{17} \text{ W}$ ) viene intercettata dalla Terra.



**Figura 1. 2** Confronto tra lo spettro del corpo nero e lo spettro del Sole (sopra), lunghezza d'onda prevalente del corpo nero (sotto)

Considerando che, mediamente in un anno, solo un terzo di questa radiazione raggiunge la superficie terrestre e che il 70% della stessa cade sugli oceani, l'energia solare annua incidente sul suolo è pari a  $1.515 \cdot 10^{17}$  kWh, più di mille volte più grande del fabbisogno energetico mondiale annuo; inoltre, poiché l'età del Sole risulta pari a circa 5 miliardi di anni, in base a quanto è ritenuto dagli astrofisici, ne consegue che, in riferimento ad una scala temporale a misura d'uomo, il Sole garantisce una fonte di energia virtualmente illimitata. Quest'ultima, però, è poco concentrata, nel senso che è necessario raccogliere energia da aree molto vaste per averne quantità significative, e, per tale motivo, risulta piuttosto difficile convertire la radiazione solare in energia facilmente sfruttabile con efficienze accettabili. Per il suo sfruttamento occorrono prodotti tecnologici in genere di costo elevato, che rendono l'energia solare notevolmente costosa rispetto ad altri metodi di generazione dell'energia; si precisa che lo sviluppo di tecnologie, che possano rendere economico l'uso di tale energia, è un settore della ricerca tuttora molto attivo, nonostante non abbia avuto ancora risultati rivoluzionari.

## Capitolo 2: Sistemi per la conversione dell'energia solare

Per la conversione della radiazione solare in altre forme di energia, che si tratti di generazione diretta di energia elettrica (effetto fotovoltaico) o riscaldamento di un fluido vettore (solare termodinamico), sono state sviluppate nel tempo molteplici soluzioni tecniche.

Lo sfruttamento della radiazione solare concentrata attraverso l'uso di convertitori allo stato solido non è ancora diffusa.

Per poter applicare la tecnologia basata su sistemi che sfruttano radiazione solare concentrata anche a piccoli impianti evitando gli svantaggi relativi ai sistemi di conversione attuali, si è posta l'attenzione su metodi alternativi di produzione di energia elettrica e termica. In particolare, si è investigato sullo sviluppo e ottimizzazione di sistemi di conversione che sfruttano emissione termoionica e termoelettricità.

Nei prossimi paragrafi verranno elencate le principali tipologie di collettori solari, evidenziandone le caratteristiche principali e gli ambiti di utilizzo. Si analizzeranno in seguito i fenomeni fisici coinvolti e il modello teorico dei dispositivi termoionici e del convertitore termoelettrico.

### 2.1 Sistemi a radiazione solare concentrata: stato dell'arte

I sistemi a radiazione solare concentrata si basano sulla concentrazione di radiazione solare in un dispositivo in grado di convertirla in energia elettrica e/o termica.

La raccolta e la concentrazione della radiazione solare, che per sua natura ha una bassa densità di potenza, rappresentano alcune delle problematiche principali degli impianti solari; esse vengono realizzate mediante l'impiego di un concentratore formato da pannelli di opportuna geometria con superfici riflettenti (normalmente comuni specchi di vetro).

La conversione di energia può avvenire sfruttando l'energia solare attraverso l'utilizzo di celle solari (CPV) o trasferendo il calore prodotto a un ciclo operante ad alta temperatura (Concentrated Solar Power\_CSP).

Nei sistemi CPV, la luce del sole viene raccolta da elementi ottici e concentrata in celle solari molto più piccole rispetto a quelle sfruttate nei sistemi fotovoltaici convenzionali, con fattori di concentrazione variabile tra 500 e 1000 soli. Attraverso l'uso di specchi e lenti (in particolare lenti Fresnel) e sfruttando inseguitori solari, la radiazione solare viene convogliata in un punto o lungo una linea. Un altro tipo di configurazione è quella che sfrutta un campo di eliostati che concentrano la radiazione solare in una torre centrale.

Agli alti livelli di concentrazione raggiunti dagli attuali sistemi ottici, il costo delle celle fotovoltaiche rappresenta una piccola parte del costo totale. Negli ultimi anni si sta diffondendo l'uso delle celle solari multigiunzione, più costose ma anche più efficienti delle celle convenzionali. La conversione della radiazione solare avviene attraverso l'utilizzo di più giunzioni p-n in serie e sfruttando materiali semiconduttori con maggiore mobilità dei portatori di carica rispetto al silicio.

Oltre al costo più elevato, i principali svantaggi che, oltre al costo più elevato, limitano la diffusione di tali sistemi di conversione sono:

- la necessità di dissipare il calore in eccesso combinando le celle con un circuito di raffreddamento, in quanto il riscaldamento delle celle ne riduce l'efficienza;
- la formazione di punti caldi, che danneggiano i singoli elementi delle celle fotovoltaiche e si estendono ad aree maggiori nel caso di un sistema di puntamento di non ideale.

Nei collettori a concentrazione, l'elemento assorbente rappresenta il componente imprescindibile per lo sfruttamento dell'energia solare, costituendo tuttavia anche la causa

di dispersioni più o meno significative, in relazione alle specifiche condizioni operative. Queste perdite possono essere limitate drasticamente concentrando la radiazione incidente su una superficie di dimensioni inferiori rispetto a quella di raccolta; i collettori solari a concentrazione (CPS), in effetti, sfruttano proprio questo principio, per mezzo di particolari dispositivi ottici capaci di far convergere l'energia elettromagnetica su un assorbitore, la cui area è più piccola di quella esposta al Sole. Tale area può essere definita come superficie di ammissione o superficie captante  $A_c$ , mentre il rapporto tra essa e l'estensione dell'assorbitore o superficie del ricevitore  $A_r$ , viene definito rapporto di concentrazione  $C$  e può variare da poco più di un'unità a diverse centinaia, a seconda dei collettori considerati:

$$C = \frac{A_c}{A_r} \quad (7)$$

Per valori di  $C$  fino a 4 si parla di bassa concentrazione, di media da 5 a 200 e al di sopra si entra nel campo dell'alta concentrazione.

Un altro parametro fondamentale è rappresentato dall'**angolo di ammissione o accettazione** dei raggi solari ( $2\theta_c$ ), che rappresenta il massimo angolo di penetrazione della luce all'interno del collettore affinché essa sia concentrata direttamente sull'assorbitore.

Il ricevitore, che ha svariate forme e che può essere unico per tutto il campo solare, oppure accoppiato a ciascun concentratore, trasforma l'energia solare in energia termica, ceduta poi ad un fluido che viene fatto passare al suo interno.

L'unico esempio di collettore a concentrazione statico è dato dai:

1. **collettori parabolici composti** o *compound parabolic concentrator* (CPC)

mentre tra i collettori a concentrazione con inseguitore solare si elencano:

2. **collettori a parabole lineari** o *parabolic trough collector* (PTC): questi sistemi sono costituiti, essenzialmente, da un concentratore in forma di riflettore cilindrico a sezione parabolica, e da un assorbitore tubolare, disposto per tutta la lunghezza del concentratore in corrispondenza del fuoco della parabola. Quando il concentratore parabolico è puntato verso il Sole, la radiazione diretta viene riflessa sul tubo ricevitore, portandolo ad alta temperatura e riscaldando così il fluido termovettore, che viene fatto scorrere al suo interno attraverso canalizzazioni di adduzione e prelievo collegate alle estremità.

La efficienza di questi componenti è notevole, potendo difatti raggiungere temperature di alcune centinaia di gradi (anche i 500° C), pur oscillando normalmente il campo operativo della piastra tra i 100° C ed i 400° C; per questo motivo, si devono impiegare appropriati fluidi termovettori, come miscele a base di acqua per le applicazioni meno intensive ed olio diatermici, o sali fusi per impieghi ad alta temperatura.

3. **collettori a lenti Fresnel** o *linear fresnel reflector* (LFR): Il collettore a lenti Fresnel può essere immaginato come una parabola lineare divisa in piccole parti, ma, al contrario del collettore parabolico, ogni lente non deve avere forma parabolica ed il sistema di inseguimento, invece che essere continuo, può essere basato su variazioni discrete. I più grandi vantaggi di questa tipologia di lenti sono dovuti a tre fattori principali.

Il primo è dato dal fatto che quest'ultime sono essenzialmente piatte o curve elasticamente, e tale geometria le rende più convenienti rispetto alla più complessa soluzione parabolica; il secondo è costituito dalla circostanza che tali lenti sono

montate vicino a terra, cosa che permette di minimizzare la complessità strutturale, mentre il terzo è rappresentato dal fatto che gli eliostati ruotano lungo l'asse longitudinale in modo da inseguire il moto del Sole e mantenere costantemente la radiazione solare riflessa sul tubo ricevitore. Tuttavia, tale rotazione avviene mediante incrementi discreti e mantenendo costante la variazione angolare tra lenti adiacenti, non richiedendo un controllo di inseguimento preciso e continuo come per le parabole lineari. Una delle difficoltà maggiori del sistema a lenti Fresnel consiste nell'evitare l'ombreggiamento ed il blocco dei ricevitori adiacenti, ciò portando ad un maggiore distacco tra i collettori, che può essere ridotto aumentando l'altezza dell'elemento assorbitore o il numero dei ricevitori, incrementando, in entrambi i casi, i costi.

Il sistema a collettori lineari di Fresnel è costituito da un campo di eliostati lineari che riflettono e concentrano la radiazione solare su un tubo ricevitore posto in posizione orizzontale fissa al di sopra dei collettori; il tubo ricevitore è in genere costituito da un tubo in acciaio protetto da vetro, ed in genere non è mantenuto sottovuoto, pur essendo tuttavia in corso esperienze anche con tubi ricevitori del tipo usato per le parabole lineari.

4. **collettori a disco parabolico** o *parabolic dish* (PDR): questo sistema utilizza un pannello riflettente di forma parabolica che insegue il Sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentra la radiazione solare su un ricevitore montato nel punto focale. Applicazioni industriali di questo sistema forniscono valori del fattore di concentrazione superiori a 2000; con tali valori si possono ottenere temperature di funzionamento molto alte e rendimenti di conversione dell'energia solare in energia elettrica anche oltre il 30 %, i più elevati tra tutte le tecnologie solari attualmente esistenti. Il motore utilizzato in questi sistemi converte l'energia solare in lavoro, come nei convenzionali motori a combustione interna o esterna, ed il fluido di lavoro viene compresso, riscaldato e fatto espandere attraverso una turbina, o un pistone, per produrre energia meccanica, che può essere utilizzata direttamente dall'utenza o trasformata in energia elettrica mediante un alternatore.
5. **sistemi a torre centrale** o *central receiver* (HFC): Il sistema a torre con ricevitore centrale utilizza pannelli riflettenti piani (eliostati) che inseguono il Sole con un movimento di rotazione su due assi, concentrando la luce solare verso un unico ricevitore; quest'ultimo è montato sulla sommità di una torre ed al suo interno viene fatto circolare un fluido per l'asportazione dell'energia solare. Il principio di funzionamento è analogo a quello del sistema a disco parabolico, con il concentratore costituito però da un elevato numero di eliostati, che vengono formare una superficie di raccolta, o captante, che può arrivare a centinaia di migliaia di m<sup>2</sup>; il tutto con un notevole risparmio globale dovuto all'economia di scala. I raggi solari che colpiscono ciascun eliostato vengono riflessi su un punto unico, fisso nel tempo, che funge da punto focale, la cui altezza, rispetto al suolo, cresce all'aumentare dell'estensione del campo solare, e può superare anche il centinaio di metri.

Gli eliostati sono dislocati in modo da circondare completamente la torre oppure sono posti a emiciclo verso nord, e tra loro distanziati per evitare fenomeni di ombreggiamento, così che la loro distanza aumenta allontanandosi dalla torre. Il fattore di concentrazione di questi impianti risulta elevato (superiore a 700 sino a 1500) e permette al fluido termovettore di raggiungere alte temperature di esercizio (maggiori di 500 °C), con conseguenti alti rendimenti di trasformazione dell'energia termica in energia elettrica, mediante un tradizionale ciclo

termodinamico acqua-vapore. Questi impianti a concentrazione hanno la possibilità di alimentare un sistema di accumulo termico per coprire in modo più soddisfacente la domanda di energia dall'utenza.

Sono stati sperimentati diversi fluidi per lo scambio termico all'interno del ricevitore e per l'accumulo dell'energia termica: acqua, aria, sodio e sali fusi. Finora, il fluido più adatto per questa tecnologia è risultato essere una miscela di sali fusi composta da nitrati di sodio e potassio; la scelta dei sali fusi è dovuta principalmente al buon coefficiente di scambio termico, alla elevata capacità termica, alla bassa tensione di vapore, alla buona stabilità chimica nonché al basso costo. Tali sali consentono di raggiungere alte temperature di esercizio (fino a 600 °C) e possono essere utilizzati direttamente per l'accumulo dell'energia termica in serbatoi compatti ed a pressione atmosferica, senza l'utilizzo di scambiatori di calore aggiuntivi.

I collettori di questo tipo, in sostanza, consentono di aumentare la superficie captante e diminuire contemporaneamente quella disperdente, godendo di tutta una serie di vantaggi, tra cui i principali sono:

- temperature del fluido termovettore in uscita più elevate;
- maggiori efficienze termodinamiche per applicazioni in cui sono utili temperature superiori ai 100;
- maggiori efficienze di conversione connesse alle minori dispersioni delle superfici assorbenti;
- costi inferiori a parità di superficie di ammissione e quindi di radiazione captata;
- le dimensioni inferiori del ricevitore rispetto alla superficie di apertura portano ad un maggiore risparmio su materiali e sulle superfici selettive e sottovuoto.

È necessario, d'altra parte, riscontrare anche alcuni fattori critici:

- maggiore complessità dei prodotti;
- sensibilità alla radiazione diffusa inversamente proporzionale al grado di concentrazione;
- nella maggior parte dei casi i collettori a concentrazione necessitano dell'impiego di sistemi ad inseguimento per l'ottimizzazione delle prestazioni;
- impiego di superfici riflettenti, che necessitano di pulitura, manutenzione e spesso degradabili nel lungo periodo.

Attualmente il costo effettivo degli impianti solari non è ancora competitivo con l'elettricità generata attraverso l'utilizzo dei combustibili convenzionali, a causa dei bassi rendimenti di conversione e del costo dei dispositivi ottici. Sono state quindi sperimentati diversi dispositivi che sfruttino l'energia solare concentrata con una efficienza di conversione più elevata e/o caratterizzati dall'uso di componenti più semplici ed economiche che vadano a ridurre i costi di impianto, come ad esempio materiali riflettenti più economici e sistemi di intercettazione della radiazione ottimizzati.

Per quanto riguarda gli impianti CSP, i sistemi di conversione da energia termica a elettrica sono i medesimi dispositivi ormai utilizzati da tempo per impianti convenzionali, come cicli Rankine (vapore) e Brayton (gas). Tali sistemi sono costituiti da un ricevitore ad alta temperatura e un sistema di trasporto del calore che trasferisca tale calore dal ricevitore al ciclo termodinamico. L'approccio che sfrutta la conversione termo-meccanica comporta



l'uso di sistemi tecnologicamente avanzati che vanno ad aumentare i costi, la complessità e la richiesta di manutenzione dell'impianto.

La cogenerazione è definita come lo sfruttamento del calore residuo per produrre ulteriore energia. Questa contribuisce ad incrementare il rendimento totale di conversione. Negli impianti CPV può coinvolgere temperature intorno a 100°C, che li rende interessanti per applicazioni di tipo termico, ma a spese delle prestazioni delle celle solari.

Negli impianti CSP la cogenerazione comporta due inconvenienti: nei più comuni cicli Rankine, recuperare calore residuo ad una temperatura adeguata rende necessario aumentare la pressione al condensatore e quindi ridurre considerevolmente il rendimento del ciclo; la cogenerazione è vantaggiosa in impianti tali da essere il più vicini possibile all'utilizzatore finale, e ciò non accade negli impianti CSP. Per questi motivi la cogenerazione in tali impianti è limitata.

## **2.2 Convertitori Termoionici**

La conversione termoionica consiste nel convertire calore direttamente in elettricità mediante lo sfruttamento del fenomeno di emissione termoionica.

La scoperta, fatta da Edison nel 1885, che un flusso di corrente elettrica tra due elettrodi poteva essere generato nel vuoto riscaldando uno dei due elettrodi diede inizio alla conversione termoionica. Le analisi e gli esperimenti sull'emissione di elettroni da un elettrodo riscaldato, conosciuta come emissione termoionica di elettroni, furono condotti da Richardson. Fu poi Schlichter nel 1915 a riconoscere questa emissione come conversione di calore in elettricità.

Nella sua forma più semplice un convertitore termoionico è costituito da un elettrodo termicamente in contatto con la fonte di calore, detto emettitore, da un secondo elettrodo connesso ad un dissipatore di calore, detto collettore, separato dal primo mediante un gap e cavi elettrici che collegano i due elettrodi. Lo spazio tra i due elettrodi può essere in vuoto o riempito con un vapore rarefatto. La fonte di calore fornisce energia termica ad alta temperatura all'emettitore, dal quale gli elettroni evaporano e, percorrendo lo spazio interelettrodico, giungono al collettore dove condensano e ritornano all'emettitore attraverso i cavi elettrici e il carico elettrico. Il flusso di elettroni attraverso il carico elettrico è mantenuto dalla differenza di funzione lavoro e temperatura che sussiste tra i due elettrodi.

I fenomeni che stanno alla base della conversione termoionica possono essere suddivisi in due classi:

1. Fenomeni di emissione: sono legati all'emissione e alla successiva raccolta di elettroni, ioni, particelle neutre e fotoni sulle superfici degli elettrodi. Tali fenomeni dipendono dal materiale di cui sono costituiti gli elettrodi, dalle proprietà termodinamiche della superficie, dalla struttura cristallografica della superficie e dai materiali assorbiti sulle superfici;
2. Fenomeni di trasporto: sono legati al movimento ed interazione tra le particelle nello spazio interelettrodico. Tali fenomeni hanno un'importante influenza sulle prestazioni del convertitore. Il fenomeno più significativo è la carica elettrica negativa degli elettroni in transito nello spazio interelettrodico. Tali elettroni costituiscono una carica spaziale negativa, di cui parleremo in seguito.

Ciò che principalmente caratterizza i convertitori termoionici sono i materiali e le temperature degli elettrodi, l'efficienza di conversione dell'energia, la potenza elettrica in uscita e la densità di corrente.

L'emettitore opera tipicamente a temperature che vanno dai 1400 ai 2200 K, mentre il collettore tra i 500 e i 1200 K. Recentemente è stato dimostrato che alcuni nuovi materiali sono in grado di emettere un elevato flusso elettronico anche a temperature intorno ai 1300 K e più basse [2].

L'efficienza di conversione può variare dal 5 al 35%; le densità di potenza vanno da 1 W/cm<sup>2</sup> ai 100 W/cm<sup>2</sup> e le densità di corrente dai 5 ai 100 A/cm<sup>2</sup>.

In generale più la temperatura dell'emettitore è elevata, migliori sono le prestazioni del dispositivo. Un convertitore termoionico può produrre dai 10 ai 500 W.

Le relativamente alte densità di potenza e efficienza e l'elevata temperatura a cui è disponibile il calore residuo rendono tali dispositivi particolarmente adatti ad applicazioni dove le dimensioni e il peso sono di primaria importanza. La mancanza di parti mobili li rende interessanti per applicazioni dove silenzio, assenza di vibrazioni e bassa manutenzione sono importanti.

**Tabella 1** Vantaggi e svantaggi dei convertitori termionivi

	Vantaggi	Svantaggi
Generatori termoionici	Elevata densità di potenza  Elevata temperatura di calore residuo  Lunga vita per applicazioni a basse potenze	Fonti di calore ad alta temperatura
Generatori termoelettrici	Lunga vita  Richiede poca manutenzione	Basse efficienze  Costi elevati
Generatori fotovoltaici	Può usare l'energia solare	Costi elevati
Celle a combustibile	Efficienze molto elevate	Richiede l'utilizzo di particolari combustibili

Tali convertitori possono essere realizzati per resistere a elevati *shock* meccanici e termici. I convertitori termoionici possono essere classificati, sulla base delle differenti fonti di calore sfruttate, nel seguente modo:

1. Generatori termoionici solari: la fonte di calore è il sole. Per ottenere un conversione efficiente devono essere utilizzati specchi parabolici o emisferici che concentrino la luce solare sull'emettitore. Tali dispositivi sono particolarmente adatti per le applicazioni spaziali, ad esempio possono essere sfruttati come sonde da porre nelle vicinanze del sole grazie alla loro abilità di resistere all'elevato irraggiamento e flussi di calore.  
A livello di peso per unità di potenza elettrica sono paragonabili ai sistemi fotovoltaici anche se richiedono sistemi di orientamento degli specchi più accurati;
2. Generatori termoionici radioisotopici: il calore proviene dal decadimento di un determinato radioisotopo;

3. Generatori termoionici collegati a reattori nucleari: il calore viene fornito dalla fissione nucleare. Esistono tre tipi di tali convertitori. In uno di questi l'emettitore è attaccato alla superficie del nocciolo del reattore e il calore residuo viene estratto mediante l'utilizzo di un fluido refrigerante. In un altro tipo il calore è trasferito dal nucleo all'emettitore per convezione. Nel terzo tipo l'emettitore è incorporato negli elementi di combustibile. In particolare la barra di combustibile è racchiusa dal materiale dell'emettitore;
4. Generatori termoionici chimici: il calore è ottenuto da combustibili come propano, gas naturale o benzina. I principali problemi di tali generatori provengono dall'effetto corrosivo dei prodotti di combustione e dal trasferimento del calore dalla fiamma all'emettitore.

La

Tabella 1 riporta vantaggi e svantaggi tra convertitori termoionici e altri sistemi di conversione diretta di energia elettrica.

.

## Capitolo 3: Principi della conversione Termoionica e Termoelettrica

### 3.1 Principi di base della conversione termoionica

Per poter comprendere l'emissione termoionica di elettroni è necessario conoscere il comportamento degli elettroni nel reticolo di un solido metallico e le forze a cui sono sottoposti quando provano a fuggire dalla superficie del metallo attraverso un vapore rarefatto o il vuoto.

La prima approssimazione da fare, detta approssimazione di Sommerfield, è quella per cui le forze a lungo raggio tra gli elettroni in un metallo sono neutralizzate dai nuclei positivi degli atomi. Questo significa che la struttura del metallo può essere trascurata quando si considera i movimenti degli elettroni. Quando un metallo di trova alla temperatura  $T$ , gli elettroni liberi possono muoversi in tutte le direzioni con diverse velocità ed energia cinetica.

Il numero medio di elettroni liberi aventi un'energia totale compresa tra  $\epsilon$  e  $\epsilon + d\epsilon$  è proporzionale al Fattore di Fermi  $v(\epsilon)$ . Tale fattore è dato dalla seguente relazione:

$$v(\epsilon) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{\epsilon - \mu}{kT}\right]} \quad (8)$$

dove:

- $k$  è la costante di Boltzmann =  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K;
- $\mu$  è una quantità tipica del metallo.

Quando l' Eq.(8) è valida si dice che gli elettroni obbediscono alla legge di Fermi-Dirac.

La quantità  $\mu$  ha le dimensioni di un'energia e numericamente equivale a quel valore di  $\epsilon$  per cui  $v(\epsilon) = 0.5$ , ed è detta Energia di Fermi.

La distribuzione di Fermi-Dirac fornisce i mezzi per calcolare il numero di elettroni liberi,  $N(\epsilon_x)d\epsilon_x$ , incidente su un'area unitaria del metallo per unità di tempo con un'energia compresa tra  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_x + d\epsilon_x$ . L'integrale di  $N(\epsilon_x)$  su tutte le energie dà il numero di elettroni liberi che arrivano vicino all'interfaccia tra metallo e vapore rarefatto per unità di area e tempo. Non tutti gli elettroni fuggono dal metallo, poiché nel momento in cui oltrepassano il confine sono soggetti a forze deceleranti che, in alcuni casi, provocano il ritorno al metallo.

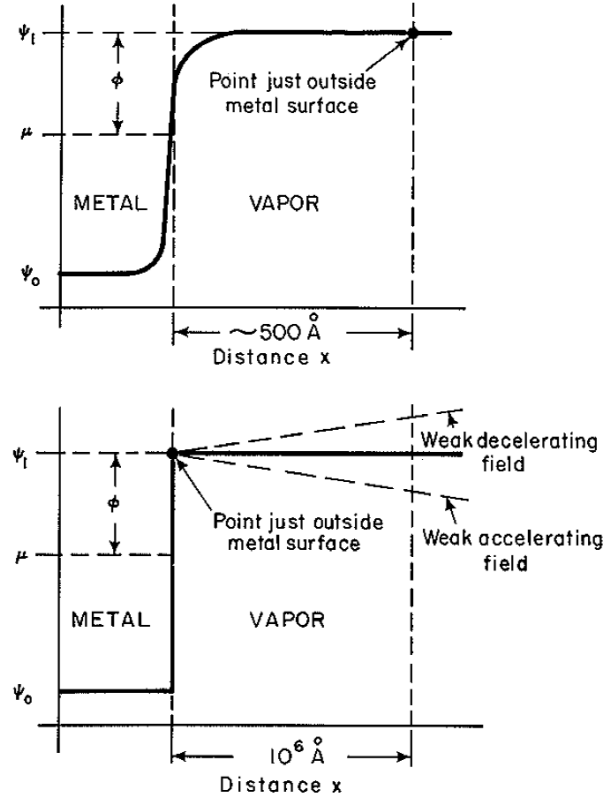
Le forze che a cui è sottoposto un elettrone nel momento in cui supera l'interfaccia tra metallo e vapore rarefatto posso essere dedotte dall' *electron motive*,  $\psi$  (andamento del livello di vuoto), definito come una quantità scalare il cui gradiente negativo in qualsiasi punto equivale alla forza esercitata sull'elettrone in quel punto. La Figura 3. 1 mostra l'andamento dell'*electron motive* con la posizione  $x$  nelle vicinanze dell'interfaccia.

All'interno del metallo, l'*electron motive* può essere considerato costante e pari a  $\psi_0$ . All'interfaccia l'elettrone risente di forze attrattive dipolo dovute al fatto che gli atomi del metallo vicini alla superficie sono trattenuti da legami asimmetrici. L'esistenza di queste forze è rappresentata dal graduale aumento di  $\psi$ . Quando l'elettrone di trova ad una distanza di 1 nm dalla superficie, le forze dipolo sono molto piccole. Oltre questa distanza l'elettrone interagisce con la superficie nel suo insieme e risente di una forza detta "forza immagine". La  $\psi$  continua a crescere oltre i 1 nm dalla superficie. Ad una distanza di 50 nm la forza di immagine diventa molto piccola per cui oltre questa distanza la  $\psi$  diventa pressoché costante.

L'applicazione di un campo elettrico esterno altera l'andamento dell'electron motive come mostrato in Figura 3. 2. Tale alterazione interessa distanze maggiori di 50 nm, a meno che il campo non sia molto forte. I punti nei quali i campi deboli cessano di influenzare la distribuzione di  $\psi$  sono detti punti appena fuori della superficie. In tali punti l'electron motive assume un valore  $\psi_1$  che dipende dalle caratteristiche della superficie del metallo. Un'altra proprietà caratteristica della superficie è la funzione lavoro  $\phi$ , definita dalla seguente formula:

$$\phi = \Psi_1 - \mu. \quad (9)$$

La differenza di electron motive  $\psi_1 - \psi_0$  tra l'interno del solido e i punti appena fuori della superficie può essere vista come una barriera di potenziale che deve essere superata dagli elettroni in uscita dal metallo. È chiaro che in assenza di un campo applicato esternamente solo quegli elettroni che hanno un'energia totale maggiore di  $\psi_1$  in direzione normale alla superficie possono fuggire.



**Figura 3. 1** Andamento dell'electron motive all'interfaccia tra metallo e vapore

In assenza di un forte campo elettrico applicato esternamente, la corrente emessa da un metallo caldo è detta corrente elettronica di saturazione. La densità di corrente  $J$  è definita attraverso l'equazione di Richardson-Dushman, Eq.(10):

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\psi_1 - \mu}{kT}\right) = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{kT}\right) \quad (10)$$

dove  $A$  è detta costante di Richardson ed è definita dalla seguente formula:

$$A = \frac{4\pi m_e k^2 e}{h^3} = 120 \frac{A}{cm^2 K^2} \quad (11)$$

ed  $e$  è la carica dell'elettrone ( $1.6021 \times 10^{-19}$  C).

Dato che i valori sperimentali della costante di Richardson differiscono dal valore teorico, tale costante è stata sostituita da un'espressione fenomenologica, utile anche per i materiali semiconduttori:

$$A_0 = A = \lambda_R (1 - r_{av}) \quad (12)$$

dove  $\lambda_R$  dalla struttura della banda di emissione del materiale e  $r_{av}$  è la frazione degli elettroni in uscita che viene riflessa dalla superficie dell'emettitore.

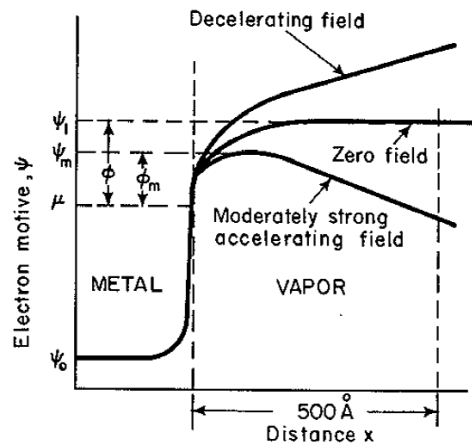
Un forte campo elettrico applicato altera l'emissione di elettroni poiché si sovrappone alla forza di immagine e la forma  $\psi$  nel vapore cambia. In Figura 3. 2 è mostrato l'andamento di  $\psi$  in presenza di un campo elettrico applicato.

Nel caso di campi moderatamente forti l'Eq.(10) può ancora essere utilizzata, ma andando a sostituire  $\phi$  con  $\phi_m$ , data dalla differenza tra la massima motive  $\psi_m$  e  $\mu$ . L'aumento di emissioni dovuto all'applicazione del campo moderatamente forte è detto effetto Schottky.

Passiamo ora ad analizzare un semplice convertitore termoionico schematizzato in Figura 3. 3 costituito da un emettitore, un collettore e un carico elettrico.

Quando il carico elettrico è connesso ai due elettrodi, la corrente termoionica scorre dal collettore all'emettitore attraverso i cavi e il carico elettrico e dall'emettitore al collettore attraverso lo spazio interelettrodico. Il flusso di tale corrente è sostenuto dalla differenza di funzione lavoro e temperatura tra gli elettrodi.

Con buona approssimazione si può affermare che il flusso di corrente tra gli elettrodi abbia un'unica direzione normale alla superficie degli elettrodi (Figura 3. 3). Questo flusso di corrente è costituito da due parti, una associata agli elettroni che sono termoionicamente emessi dall'emettitore e raggiungono il collettore e un altro associato agli elettroni che sono termoionicamente emessi dal collettore e raggiungono l'emettitore.



**Figura 3. 2** Electron motive all'interfaccia metallo-vapore in presenza di un campo elettrico applicato esternamente

La corrente elettronica emessa per unità di superficie relativa all'emettitore è detta densità di corrente dell'emettitore ed è definita dall'Eq.(13):

$$J_E = AT_E^2 \exp\left(-\frac{\phi_E}{kT_E}\right) \quad (13)$$

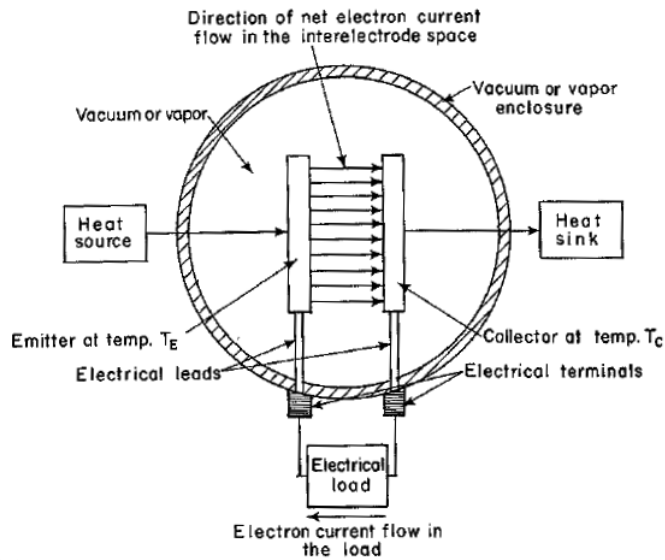
dove  $\phi_E$  è la funzione lavoro dell'emettitore. Similmente, la densità di corrente del collettore detta anche emissione di ritorno è definita come in Eq.(14):

$$J_C = AT_C^2 \exp\left(-\frac{\phi_C}{kT_C}\right) \quad (14)$$

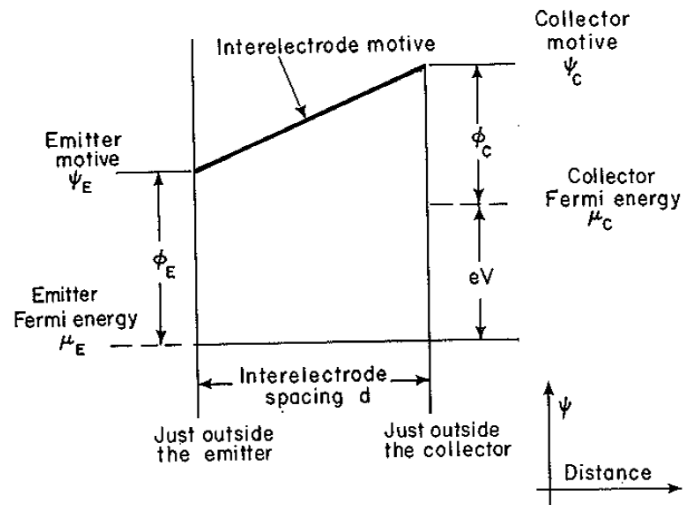
dove  $\phi_C$  è la funzione lavoro del collettore.

La distribuzione dell'electron motive nel gap tra gli elettrodi è descritta dal diagramma dell'interelectrode motive.

In Figura 3. 4 è mostrato l'andamento del livello di vuoto in condizioni ideali di trasporto delle particelle.



**Figura 3. 3** Schema di un convertitore termoionico



**Figura 3. 4** Interelectrode motive in condizione di trasporto ideale delle particelle

Come si può notare l'andamento varia linearmente con la distanza, da un punto appena fuori dell'emettitore ad un punto appena fuori del collettore.

Il valore di  $\psi$  appena al di fuori dell'emettitore è detto  $\psi_E$  mentre quello appena al di fuori del collettore è detto  $\psi_C$ .

Le funzioni lavoro dell'emettitore e del collettore possono essere definite dalle Eq. (15) e (16):

$$\psi_E - \mu_E = \phi_E \quad (15)$$

$$\psi_C - \mu_C = \phi_C \quad (16)$$

Se il collettore, l'emettitore, i cavi elettrici e il carico si trovassero alla medesima temperatura, la differenza  $\mu_C - \mu_E$  rappresenta il lavoro compiuto da un elettrone che procede dal collettore all'emettitore attraverso i cavi e il carico. In altre parole questa differenza rappresenterebbe la tensione misurata da un voltmetro connesso a due punti, uno dentro l'emettitore e uno dentro il collettore. Si può quindi dedurre che per date funzioni lavoro, i valori di  $\psi_E$  e  $\psi_C$  dipendono dal valore della tensione di uscita. In Figura 3. 5 sono mostrati tre tipici andamenti dell'interoelettrode motive nei quali  $\psi_E$  è maggiore, minore e uguale a  $\psi_C$ .

Si definisce la densità di potenza in uscita come:

$$w = JV \quad (17)$$

dove  $J$  è la densità di corrente in uscita ed è definita come:

$$J = J_E - J_C \quad (18)$$

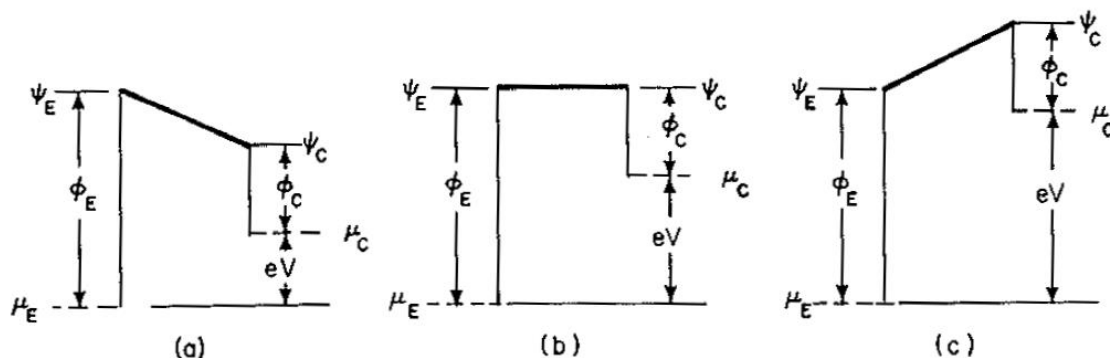
La potenza in uscita è quindi definita come il prodotto della densità di potenza  $w$  per l'area attiva degli elettrodi  $S$ , cioè l'area che si affaccia sul gap interoelettrodo.

Quando  $J$  e  $V$  sono positive il convertitore termoelettrico produce potenza, e questo avviene quando la corrente netta fluisce dall'emettitore al collettore attraverso il gap e l'energia di Fermi del collettore è più grande di quella dell'emettitore.

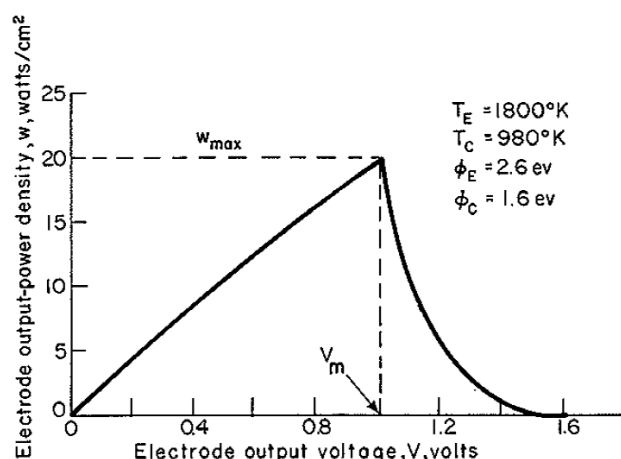
Per date funzioni lavoro e temperature, la relazione tra la potenza in uscita e la tensione in uscita è detta caratteristica della potenza in uscita.

Come si può notare in Figura 3. 6 per un valore di tensione in uscita pari a  $V_m$  il convertitore genera la massima potenza. Se l'emissione di ritorno è trascurabile, la potenza ideale in uscita varia linearmente con la tensione per valori di tensione inferiori a  $V_m$ , per valori superiori decresce esponenzialmente.





**Figura 3. 5** Interelectrode motive per differenti valori della tensione di uscita



**Figura 3. 6** Caratteristica della potenza ideale in uscita

Il rendimento di conversione di un convertitore termoionico  $\eta_{th}$ , essendo un dispositivo termico allo stato solido è limitato dal rendimento di Carnot:

$$\eta_{th} \leq 1 - \frac{T_C}{T_H} = \eta_{Carnot} \quad (19)$$

A differenza dei sistemi di conversione che sfruttano fluidi, come lo Stirling, il Rankine o il Brayton, quelli che sfruttano l'effetto termoionico hanno rendimenti molto vicini a quello di Carnot grazie al fatto che l'elevata differenza di temperatura tra emettitore e collettore può essere mantenuta durante l'esercizio.

### 3.2 Effetti di carica spaziale nel convertitore termoionico

Affrontiamo adesso un argomento di particolare interesse ai fini della tesi, gli effetti di carica spaziale che si verificano nel gap interelettrodico. Come si è detto nel paragrafo precedente, tali effetti rientrano nella categoria dei fenomeni di trasporto, legati cioè alla migrazione ed interazione tra le particelle nello spazio interelettrodico.

Quando un elettrone lascia la superficie del solido, la sua traiettoria è fortemente influenzata dal campo elettrico generato dagli elettroni precedentemente emessi. Questi

ultimi creano una nuvola di carica negativa vicino alla superficie dell'emettitore, respingendo altri elettroni.

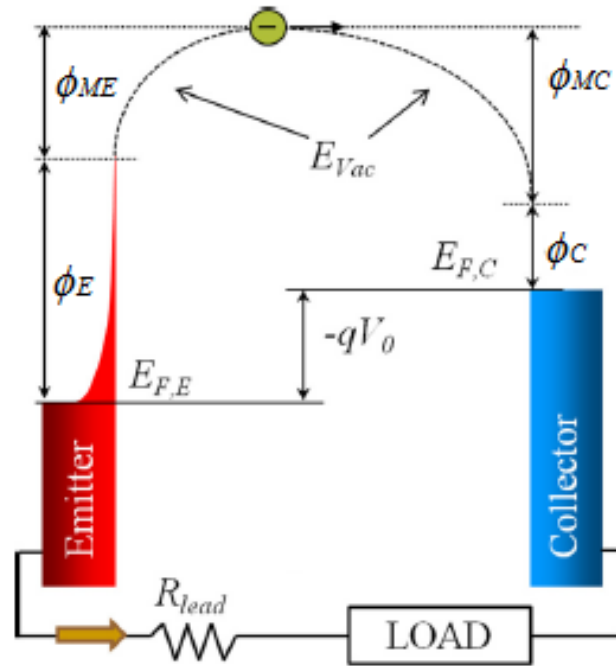
Questo fa sì che una frazione degli elettroni emessi non raggiunga il collettore, causa della barriera di potenziale aggiuntiva, e ritorni all'emettitore. L'andamento del potenziale nella zona tra gli elettroni è rappresentato in Figura 3. 7.

La formazione di questa regione di carica spaziale nel gap tra gli elettrodi riduce drasticamente la densità di corrente, la potenza in uscita e le prestazioni del dispositivo. Infatti tale carica genera un potenziale elettrico negativo che presenta il suo massimo,  $\phi_{SC,max}$ , nel gap vicino alla superficie dell'emettitore. Solo gli elettroni con un'energia cinetica iniziale più elevata di  $(\phi + e\phi_{SC,max})$  possono raggiungere il collettore.

La formula della densità di corrente diventa la seguente:

$$J = AT_E^2 e^{-\frac{\phi_E - \phi_{ME}}{k_B T_E}} - AT_C^2 e^{-\frac{\phi_C - \phi_{MC}}{k_B T_C}} \quad (20)$$

Esistono vari metodi per ridurre gli effetti di carica spaziale. Analizziamoli in base alle diverse tipologie di convertitori termoionici.



**Figura 3. 7** Diagramma dell'energia del processo di conversione:  $E_{F,E}$  ed  $E_{F,C}$  sono i livelli di Fermi dell'emettitore e del collettore;  $\phi_E$  e  $\phi_C$  sono le funzioni lavoro dei due elettrodi e  $\phi_{ME}$  e  $\phi_{MC}$  sono le barriere di potenziale aggiuntive;  $V_0$  è la differenza di voltaggio tra i due elettrodi e  $-q$  è la carica dell'elettrone.

I convertitori possono essere suddivisi in due categorie:

1. Convertitori termoionici in vuoto;
2. Convertitori termoionici il cui spazio interelettrodico è riempito di vapore o gas.

Della prima categoria fanno parte:

- a. Diodo da vuoto con elettrodi ravvicinati: in tale dispositivo l'effetto di carica negativa viene soppresso riducendo la distanza tra gli elettrodi a distanze comprese tra 1 e 10  $\mu m$ . Questo consente di ridurre il numero di elettroni in transito [7];

- b. Triodi da vuoto: in tale dispositivo l'effetto di carica è soppresso sfruttando un elettrodo ausiliare sul quale vengono applicati un campo elettrico ed uno magnetico. Tale elettrodo aumenta la velocità degli elettroni e, per una data corrente elettronica, riduce il numero di elettroni in transito [4];

Della seconda categoria fanno parte:

- a. Diodo con cesio: l'effetto di carica negativa viene parzialmente o totalmente neutralizzato dagli ioni positivi del cesio che vengono termionicamente emessi dalla superficie calda dell'emettitore o generati da fenomeni di impatto nel gap. L'emissione termoionica avviene perché gli atomi del vapore di cesio sono adsorbiti dalla superficie dell'emettitore e successivamente vengono desorbiti come ioni positivi;
- b. Diodo modulato: l'effetto di carica negativa viene neutralizzato da ioni positivi che vengono prodotti applicando impulsi di tensione di breve durata al vapore di riempimento;
- c. Diodo irraggiato: l'effetto di carica negativa viene neutralizzato da ioni positivi che vengono prodotti sfruttando una radiazione ionizzante;
- d. Triodi con vapore: l'effetto di carica negativa viene neutralizzato da ioni positivi emessi da un materiale emettitore di ioni posto sulla superficie di un elettrodo ausiliare.

### **3.3 Principi di base della conversione termoelettrica**

Nel corso del 1800 la termoelettricità ha assunto contorni sempre più definiti grazie alla scoperta dei suoi principali effetti, dovuti agli studi di Thomas Johann Seebeck, Jean Charles Athanase Peltier e William Thomson (Lord Kelvin). Nel 1821 il fisico estone T.J. Seebeck notò che in un circuito costituito da conduttori metallici o semiconduttori diversi (rame e bismuto) collegati fra loro, una differenza di temperatura generava una deviazione di un ago magnetico in prossimità del circuito. Seebeck interpretò le proprie osservazioni collegandole erroneamente al campo magnetico terrestre. Fu il fisico danese Hans Christian Ørsted a rendersi conto due anni dopo che il fenomeno aveva invece origine elettrica, decretando ufficialmente la scoperta di quello a noi oggi noto come effetto Seebeck. Nel 1834 J. C. A. Peltier osservò che una corrente elettrica che scorre in un conduttore costituito da due metalli diversi genera una differenza di temperatura che non può essere ricondotta all'effetto Joule, scoprendo di fatto l'effetto Peltier (l'inverso dell'effetto Seebeck). Nel 1838 il fisico russo Heinrich Lenz dimostrò che quel calore era assorbito o liberato alla giunzione tra i due conduttori a seconda del verso di percorrenza della corrente. Nel 1851 infine, il fisico inglese William Thomson (Lord Kelvin) dimostrò che gli effetti Seebeck e Peltier sono strettamente correlati tra loro: un materiale sottoposto a un gradiente termico e percorso da una corrente elettrica scambia calore con l'ambiente esterno e, reciprocamente, un materiale sottoposto a un gradiente termico e percorso da un flusso di calore genera una corrente elettrica. La differenza fondamentale tra gli effetti Seebeck e Peltier considerati separatamente e l'effetto Thomson è che quest'ultimo si manifesta in un singolo materiale (effetto termoelettrico "omogeneo") e quindi non necessita di giunzioni per essere rilevato. Più di recente, in particolare nel ventennio 1950-1970, sono stati scoperti numerosi materiali con proprietà termoelettriche piuttosto interessanti. È il caso ad esempio del tellururo di bismuto ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), impiegato nelle celle di Peltier in commercio (piastrine refrigeranti), o delle leghe di silicio e germanio ( $\text{SiGe}$ ) utilizzate per l'alimentazione delle sonde spaziali nei generatori termoelettrici a radioisotopi. Tuttavia il loro scarso rendimento energetico e gli alti costi dei sistemi di

conversione termoelettrica ne hanno limitato l'impiego a ristrette nicchie di mercato, anche se i nuovi progressi tecnologici unitamente alla crescita dei costi dell'energia e a una maggiore sensibilità per le esigenze ambientali, stanno sollecitando importanti ricerche scientifiche in questo campo.

La termoelettricità è un fenomeno fisico che opportunamente ingegnerizzato consente di recuperare parte dell'energia dissipata sotto forma di calore convertendola in corrente elettrica.

I convertitori termoelettrici, rispetto ai dispositivi che sfruttano cicli termodinamici hanno i seguenti vantaggi:

- Nessuna parte in movimento, nessuna vibrazione;
- Nessun processo meccanico o chimico,
- Silenziosità e nessuna emissioni;
- Robustezza e durabilità con elevata affidabilità (>25000 ore);
- Poca manutenzione.

Uno svantaggio di questi dispositivi è il basso rendimento intorno al 5-6%.

I primi dispositivi che sfruttavano tali proprietà erano realizzati interamente con materiale inorganico metallico. Successivamente sono stati introdotti dispositivi basati su giunzioni p-n, poste elettricamente in serie e termicamente in parallelo.

Si tratta di dispositivi costosi a causa dell'elevato costo dei materiali di partenza, della bassa scala di produzione e delle tecniche coinvolte nel processo realizzativo.

La conversione di calore in energia elettrica avviene direttamente grazie all'effetto Seebeck.

Tale effetto è dovuto alle differenti velocità di distribuzione dei portatori di carica a differenti temperature.

Il numero di portatori di carica liberi in un metallo all'equilibrio termodinamico cresce con la temperatura secondo la statistica di Fermi Dirac. Pertanto un campione soggetto ad un gradiente di temperatura sviluppa inevitabilmente un gradiente di concentrazione di portatori e quindi, in ultima analisi, una corrente di diffusione. Se il campione è isolato questa corrente da luogo ad un accumulo di carica opposta alle due estremità e quindi ad un campo elettrico crescente che si oppone alla diffusione di ulteriori cariche.

Il sistema raggiunge l'equilibrio quando il campo elettrico induce una corrente di drift di pari intensità ed opposta a quella di diffusione. Poiché ad un campo elettrico è associato un potenziale elettrostatico dato dall'Eq.(21):

$$E = -\nabla V \quad (21)$$

ad equilibrio raggiunto si osserva una tensione ai capi del campione che è funzione del gradiente di temperatura indotto. Sperimentalmente si esprime il coefficiente di Seebeck nel modo seguente:

$$S = \frac{E}{\nabla T} = -\frac{\nabla V}{\nabla T} = -\frac{dV}{dT} \quad (22)$$

Il fenomeno si presenta in forma analoga nei semiconduttori organici e inorganici. L'unica differenza risiede nella definizione dei quasi livelli di Fermi in banda di conduzione e di valenza e dei corrispondenti (quasi) equilibri termodinamici intrabanda. La corrente di diffusione è la somma della corrente di buche ed elettroni. Poiché le correnti di diffusione di buche ed elettroni sono parallele in modulo, i campi da esse generati tendono a cancellarsi.

Ad equilibrio raggiunto dall'elettrostatica vale la seguente equazione:

$$E_{el} + E_{buche} = E = -\nabla V \quad (23)$$

E' evidente che un materiale caratterizzato da un alto coefficiente di Seebeck deve possedere una densità di portatori maggioritari di tipo n o p, altrimenti i campi generati finirebbero per annullarsi l'un l'altro.

Risulta dunque possibile generalizzare la trattazione per un qualsiasi conduttore caratterizzato da portatori positivi e/o negativi, affermando che il segno del coefficiente Seebeck dipende strettamente dal tipo di portatori maggioritari: è positivo per portatori maggioritari p, è negativo per portatori maggioritari di tipo n. E' evidente che per poter sfruttare l'effetto Seebeck generando una tensione di pratico utilizzo si deve necessariamente ricorrere a due conduttori saldati insieme. Un unico conduttore sarebbe soggetto ad un gradiente termico locale, ma la differenza di temperatura tra i suoi estremi sarebbe nulla; quindi si svilupperebbero delle f.e.m. solo localmente, e queste si sommerebbero a dare una f.e.m. termoelettrica globalmente nulla.

L'efficienza termoelettrica di un materiale si misura attraverso la sua figura di merito adimensionale, definita in Eq.(24):

$$ZT = \frac{S^2}{\rho\kappa} T \quad (24)$$

dove:

- S è il coefficiente Seebeck (la caduta di tensione ai capi del campione per effetto del gradiente di temperatura applicato ai suoi estremi);
- $\rho$  è la resistività elettrica;
- $\kappa$  è la conducibilità termica;
- T è la temperatura.

Dunque un termoelettrico ad alta efficienza dovrebbe condurre corrente come un metallo ed isolare termicamente come un vetro.

La figura di merito intrinseca per una coppia semiconduttrice p-n, da considerarsi come un singolo elemento di un generatore termoelettrico, è data dall'Eq. (25):

$$ZT_{intrinseca} = \frac{(S_p - S_n) \times T}{(\sqrt{\rho_p \kappa_p} + \sqrt{\rho_n \kappa_n})^2} \quad (25)$$

dove i pedici p ed n stanno ad indicare rispettivamente i parametri riferiti ai semiconduttori di tipo p e n.

Infine il rendimento di un dispositivo termoelettrico ideale è strettamente correlato con  $ZT_{intrinseco}$  ed è definito dall'Eq. (26) :

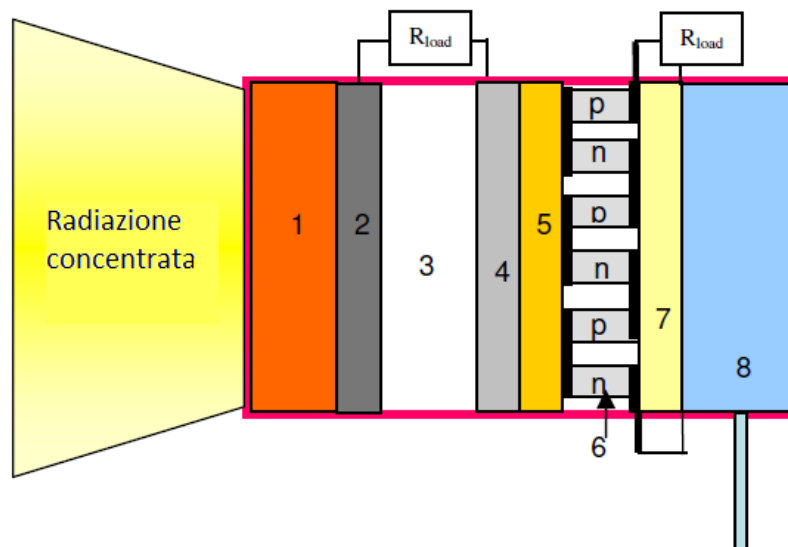
$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT_{intrinseco}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{intrinseco}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (26)$$

Dove  $T_h$  e  $T_c$  sono rispettivamente le temperature del lato freddo e di quello caldo del modulo termoelettrico.

## Capitolo 4: Dispositivo di Conversione

### 4.1 Descrizione del dispositivo di conversione

Questa tecnologia proposta dall'Istituto di Struttura della Materia (ISM) del CNR sfrutta un innovativo modulo di conversione allo stato solido per operazioni a temperature tra i 700° e 1000°C, detto ST<sup>2</sup>G (Solar Thermionic-Thermoelectric Generator). Il modulo include uno stadio termoionico ad alta temperatura ed uno stadio termoelettrico a media temperatura connessi in serie.



**Figura 4. 1** Schema della struttura del modulo di conversione: (1) Assorbitore; (2) Elettrodo termoionico; (3) Spazio interelettrodo < 1mm; (4) Collettore termoionico; (5) Strato elettricamente isolante e termicamente conduttivo; (6) convertitore termoelettrico; (7) Strato elettricamente isolante e termicamente conduttivo; (8) dissipatore di calore.

In Figura 4. 1 si riporta uno schema del modulo di conversione. Il dispositivo opera in condizioni di vuoto spinto ( $<10^{-5}$  mbar) poiché gli elettroni emessi necessitano un percorso libero da particelle per viaggiare dal catodo all'anodo del convertitore termoionico.

Il dispositivo termoionico sfrutta il calore fornito dalla radiazione concentrata assorbita dall'assorbitore per generare potenza elettrica inducendo una emissione elettronica dall'elettrodo al collettore. Il calore residuo del collettore è trasferito per contatto diretto al lato caldo del modulo termoelettrico. La corrente in uscita è data dalla somma delle correnti prodotte nei due moduli. Il dispositivo termoionico è efficiente alle alte temperature, mentre quello termoelettrico opera meglio a temperature più moderate, inferiori ai 450°C, dove la corrente termoionica tende a zero. Queste caratteristiche complementari rendono possibile l'accoppiamento dei due dispositivi in tandem.

Nel seguente capitolo andremo a descrivere e analizzare il dispositivo oggetto di tesi.

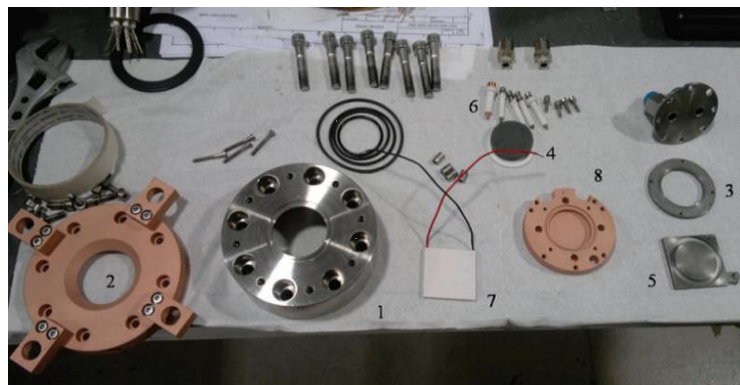
Il disegno e lo sviluppo del prototipo dell'ST<sup>2</sup>G ha indotto alla fabbricazione di tre differenti versioni di modulo di conversione (*conversion module* - CM):

- CM-Alpha: questa versione è costituita dalle sole parti attive del modulo di conversione, che rappresentano il cuore dell'ST<sup>2</sup>G e che di conseguenza è parte integrante delle versioni successive. I test di tale versione sono stati condotti inserendo il dispositivo all'interno di una camera di vuoto e sfruttando un simulatore di flusso solare;

- CM-Beta: tale versione è stata sviluppata per valutare il potenziale della tecnologia testandola in una piattaforma solare, cioè una fornace solare, ed è stata montata in una adatta camera di vuoto in modo da funzionare con un pompaggio continuamente attivo;
- CM-Gamma: questa versione, detta incapsulata, è in grado di funzionare autonomamente su una piattaforma solare, idealmente senza un pompa esterna aggiuntiva; nella pratica invece è stata connessa ad un sistema di pompaggio intermittente.

Le scelte tecnologiche sono state fatte per soddisfare i seguenti criteri:

- Compattezza: il modulo deve essere il più compatto possibile per ridurre il volume interno e minimizzare le perdite di calore ed ottiche. La minimizzazione del volume interno è ancora più importante nella versione Gamma, poiché il livello di vuoto deve essere garantito dalla presenza di getter passivi e quindi un volume minore corrisponde a minori problemi dovuti a fenomeni di degassamento dei materiali interni;
- Facilità di montaggio: la cavità è stata realizzata per agevolare il montaggio del modulo sul supporto;
- Scalabilità: il disegno è completamente scalabile alle dimensioni più elevate;
- Robustezza: è stato studiato un metodo adatto per fissare gli elementi attivi alla flangia di supporto e favorire il recupero del calore residuo.



**Figura 4. 2** Elementi che costituiscono la versione Beta: (1) Corpo di Flangia DN63CF; (2) Dissipatore di calore; (3) ghiera di molibdeno; (4) Assorbitore e distanziatore ad anello; (5) Collettore; (6) Barre di rame e viti di molibdeno con cilindri isolanti per connessione elettrica con il modulo termoeionico; (7) Modulo termoelettrico (8) Elementi di supporto, saldatura e chiusura

La realizzazione del pezzo è basata sull'idea di collocare il modulo di conversione all'interno del corpo di una flangia dalla forma compatibile con una flangia ConFlat DN63CF, così che il dispositivo sia compatto e versatile. Il prototipo è chiuso da una flangia commerciale DN63CF con finestra in silicio fuso. L'acqua di raffreddamento scorre in una cavità ricavata nella flangia, il flusso è garantito da due connettori esterni.

Le connessioni elettriche esterne sono costituite da tre adattatori flangiati e un BNC, saldato alla flangia. Uno dei connettori è dedicato alla creazione del vuoto, gli altri due sono realizzati per le termocoppie e la connessione elettrica, in particolare quello dedicato alla termocoppia è più lungo. La connessione BNC è usata per l'attivazione elettrica dei getters presenti nella camera, necessari per il mantenimento del vuoto nel dispositivo. È stato realizzato un dissipatore di rame frontale ideato per raffreddare la finestra. Tale configurazione è stata pensata per ridurre al minimo le perdite ottiche e rendere il dispositivo commercialmente competitivo in un futuro, riducendo ampiamente le sue dimensioni.



La parte attiva del modulo di conversione è stata disegnata in modo tale da ridurre lo spazio occupato. Il lato caldo del modulo termoelettrico è in contatto diretto con il collettore, mentre il lato freddo è in contatto diretto con la flangia.

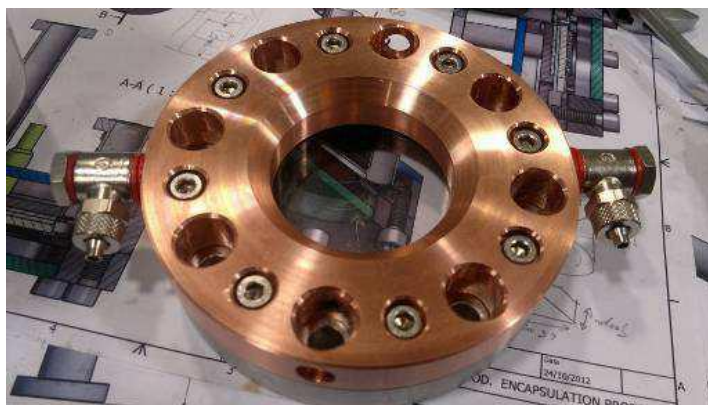
In fase di tesi alcuni parametri geometrici sono stati variati per verificare il comportamento termico del dispositivo.

Nei seguenti paragrafi andremo a descrivere i componenti che costituiscono il modulo di conversione.

- **Dissipatore**

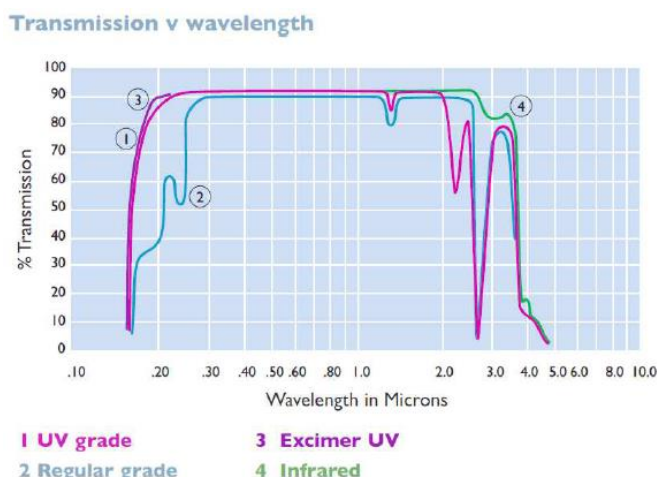
Questo elemento è costituito da rame e presenta un cavità all'interno della quale fluisce l'acqua necessaria a estrarre calore dalla finestra e dalla zona frontale del modulo. Il dissipatore è fissato alla Flangia di supporto per la finestra da 8 viti M5 e la sua presenza è necessaria per tenere sotto controllo la temperatura della finestra. Il dissipatore è realizzato in modo tale da massimizzare la radiazione solare concentrata sull'assorbitore; il foro che consente l'ingresso della radiazione ha la forma di un tronco di cono con un'inclinazione di 45 gradi, angolo caratteristico del fascio di luce al bordo.

Il dissipatore è mostrato in



**Figura 4. 3** Dissipatore fissato alla flangia

- **Supporto per la finestra**



**Figura 4. 4** Flangia di supporto per la finestra (sinistra); Spettro di trasmissione del quarzo (destra)

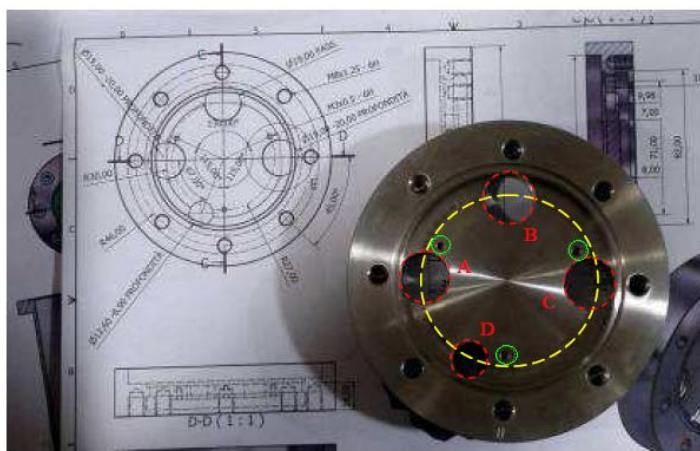
È stata selezionata una finestra commerciale in quarzo MDC Caburn CF63 di grado UV con spessore di 6.4 mm e diametro di 63mm. La flangia è stata scelta per essere adatta a condizioni di vuoto spinto e il produttore dichiara un tasso di perdita inferiore a  $2 \times 10^{-10}$



mbar  $\times$  l/s in un range di temperatura superiore a 200 °C. La Fig. 4.4 (sulla destra) mostra lo spettro di trasmissione del quarzo usato per la finestra, fornito dal datasheet dell'MDC, che approssimativamente è maggiore del 90% su tutto lo spettro solare. Nella parte frontale ci sono otto fori M8 filettati per fissare la flangia e cinque filettature M5 per fissare il dissipatore di calore alla flangia.

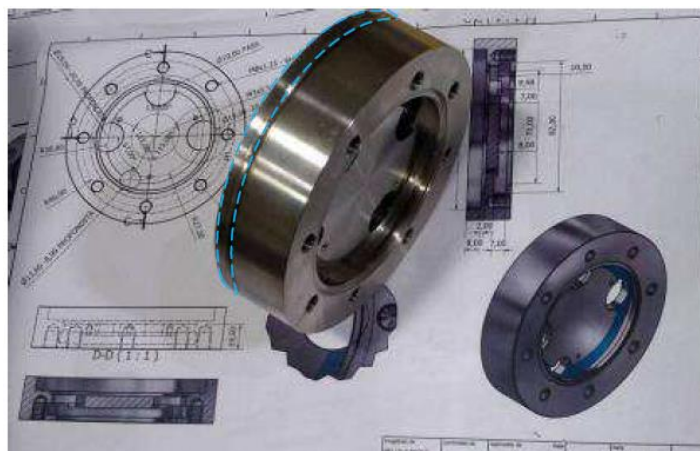
- **Corpo della flangia DN63CF**

Il corpo di flangia in acciaio inossidabile rappresenta l'alloggiamento per il dispositivo ed è facilmente montabile. La flangia, con uno spessore di 24.5 mm, ha una forma tale da accogliere tutti i componenti del modulo di conversione. Nella parte posteriore la flangia presenta una cavità di 8 mm per l'acqua di raffreddamento. Il dispositivo di conversione è collocato su una seduta circolare di diametro pari a 30 mm e spessore di 2 mm (Figura 4. 5 , evidenziato in giallo).



**Figura 4. 5** Corpo di Flangia: vista frontale

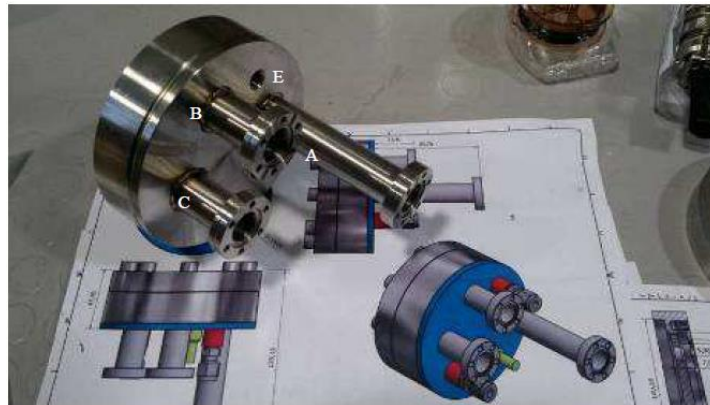
In tale seduta sono presenti tre filettature posizionate ad un angoli reciproci di 115°, 115° e 130°, per consentire il collocamento e il fissaggio del dispositivo di conversione (Figura 4. 6 , evidenziate di verde). Tali angoli sono stati scelti per adeguarsi alla presenza dei connettori.



**Figura 4. 6** Corpo di flangia: vista laterale

I connettori per l'alimentazione esterna sono formate da cilindri di acciaio di raggio pari a 19 mm, da un lato sono dotati di flangia 16CF e dall'altro sono saldati al corpo della

flangia. Sono necessarie due saldature per ogni connettore così da garantire l'isolamento per la cavità dell'acqua, una sul lato posteriore del corpo di flangia e un'altra all'interno del corpo. In particolare la seduta circolare del dispositivo è realizzata in modo tale da adattarsi alle connessioni. I tre fori sono posizionati ad un angolo di  $90^\circ$  e uno dei connettori è più lungo per ospitare i cavi di alimentazione delle termocoppie, che sono più lunghi delle connessioni standard. Facendo riferimento alla Figura 4. 7 è presente il connettore BNC, contraddistinto dalla lettera D, che viene collocato in un foro di raggio pari a 12.6 mm posizionato a  $67^\circ$  dal connettore A. Tutti i connettori sono saldati con la tecnica TIG (Tungsten Inert Gas), senza l'utilizzo di metallo.



**Figura 4. 7** Vista sui connettori

- **Ghiera di molibdeno**

Questo componente serve per sostenere l'assorbitore-emettitore e assicura la connessione elettrica con l'emettitore termoionico. La ghiera è fatta di molibdeno e tale materiale è stato selezionato per garantire un buon contatto termico ed elettrico con l'assorbitore. Sono presenti tre filettature posizionate a  $115^\circ$ ,  $115^\circ$  e  $130^\circ$  rispetto al centro, necessarie per fissare la ghiera al corpo della flangia e tenere il dispositivo di conversione saldamente fissato alla seduta.



**Figura 4. 8** Ghiera di molibdeno: vista frontale (sinistra) e posteriore (destra)

L'uscita elettrica termoionica è connessa attraverso l'uso di una vite di molibdeno.

Le scelte sulla forma della ghiera rendono tale componente molto compatto e robusto, in quanto in questo modo l'integrazione con la parte attiva è solida. Le viti utilizzate per fissarlo al corpo di flangia sono di allumina, materiale termicamente ed elettricamente isolante. Tali viti sono serrate a cilindri filettati in Macor<sup>TM</sup>, un vetro-ceramica lavorabile principalmente composto da silice, ossido di magnesio e ossido di alluminio, Macor è un isolante termico ed elettrico. Tali cilindri sono fissati al corpo della flangia da grani di acciaio filettati. La ghiera presenta un vano per collocare l'assorbitore.

- **Modulo Termoionico**

Tale modulo è costituito da un assorbitore, un collettore e un anello distanziatore che operano in condizioni di vuoto spinto. Il vantaggio di utilizzare un modulo sottovuoto è che l'emettitore può operare ad una temperatura inferiore e può raggiungere elevati livelli di tensione in uscita perché l'unico limite è dato dagli effetti di carica negativi nel gap. Come si è già spiegato nel capitolo precedente, tali effetti possono essere ridotti riducendo la distanza tra gli elettrodi.

In passato tale tipologia di modulo di conversione non ha trovato applicazioni pratiche per le seguenti ragioni:

- impossibilità di ottenere piccole distanze interelettrodeiche [3];
- i materiali emettitori conosciuti, quando funzionavano nel vuoto ad una temperatura vicina a quella richiesta per ottenere prestazioni elevate, evaporavano così rapidamente da limitare la vita utile del dispositivo a pochi minuti, altri avevano funzioni lavoro più elevate di quelle richieste per prestazioni elevate [3].

Grazie alla tecnologia oggi sviluppate e agli studi condotti dall'ISM del CNR, è stato possibile superare tali limiti e ottenere un dispositivo che, se adeguatamente ottimizzato, può raggiungere buoni rendimenti.

**a. Assorbitore ed emettitore di elettroni**

Il compito dell'assorbitore è catturare efficientemente la radiazione solare concentrata e garantire un'alta temperatura per l'emettitore termoionico, collocato direttamente sul suo lato posteriore.

Un assorbitore solare ideale deve avere le seguenti caratteristiche:

- termicamente e meccanicamente stabile alle alte temperature;
- la sua conducibilità termica deve essere alta così da fornire energia termica all'emettitore evitando elevati gradienti di temperatura;
- la sua conducibilità elettrica deve essere elevata per consentire il trasferimento di elettroni senza perdite ohmiche;
- la sua assorbanza deve essere la più alta possibile nello spettro solare nel campo degli UV, del visibile e dei IR.
- la sua emissività alle alte temperature deve essere la più bassa possibile per ridurre le perdite per irraggiamento;
- buona adesione e compatibilità con lo strato di materiale emettitore.

Sono stati presi in considerazione vari materiali e sulla base di tali requisiti è stato scelto il carburo di afnio le cui caratteristiche sono riportate di seguito. Il materiale specifico è stato sviluppato dall'ISTEC del CNR (Dr.ssa Diletta Sciti).

Materiale	Acronimo	$\rho$ [g cm <sup>3</sup> ]	$k$ [W/m K]		
			RT	500°C	1000°C
HfC + 5% MoSi <sub>2</sub>	HCM-5	11,17	23	23	35

L'assorbitore ha una forma cilindrica con spessore di 3 mm e diametro di 35 mm, vedi Figura 4. 9

Per massimizzare l'assorbanza solare si è sottoposta la faccia esposta alla radiazione ad un trattamento di laser a Femtosecondi così da creare una serie di nanostrutture (dell'ordine delle centinaia di nm).

Come si è scritto in precedenza, l'emettitore termoionico è depositato sulla faccia posteriore dell'assorbitore. Per massimizzare l'emissione di elettroni alle basse temperature è necessario utilizzare una superficie con funzione lavoro bassa.



**Figura 4. 9** Assorbitore di Carburo di Afnio

Nel caso di emettitori di materiale metallico spesso si utilizzano adsorbitori come il cesio o ossidi . per emettitori semiconduttori tale scopo può essere raggiunto con coperture che abbassano l'affinità elettronica, riducendo la barriera di energia per l'emissione di elettroni. È stato introdotta un copertura di diamante drogato con azoto chimicamente depositato sotto forma di vapore (CVD - chemical vapor deposition). L'aggiunta di gas di azoto induce uno spostamento del livello di fermi dello strato nella banda di conduzione e ciò riduce la barriera di potenziale per l'emissione elettronica.

Un altro processo fondamentale è l'aggiunta di idrogeno al bordo della superficie di diamante in modo da ridurre l'affinità elettronica sino a valori negativi [12] e [13]. La terminazione di idrogeno è ottenuta esponendo il film di diamante CVD al plasma a idrogeno.

L'emettitore termoionico deve creare dei legami fisici stabili con il materiale dell'assorbitore così da massimizzare il flusso termico.

#### ***b. Distanziatore a forma di anello***

Questo componente è realizzato con materiale termicamente ed elettricamente isolante (zirconio o allumina), ha la funzione di mantenere separati l'emettitore e il collettore del modulo termoionico, ad una distanza inferiore ai 100  $\mu\text{m}$ . Questa distanza è stata ottenuta fabbricando un anello più spesso rispetto alla sua seduta nel collettore di 100 $\mu\text{m}$ , vedi Figura 4. 10

#### ***a. Collettore di Molibdeno***



**Figura 4. 10** Anello distanziatore di allumina

Il collettore dello stadio termoionico, Figura 4. 2 (5), è costituito da molibdeno e presenta uno spessore di 4 mm. Tale spessore permette di ottenere una maggiore dissipazione di calore alle alte temperature e fornisce una maggiore protezione al modulo termoelettrico. La superficie del collettore è meccanicamente lappata con polvere di diamante per ottenere:

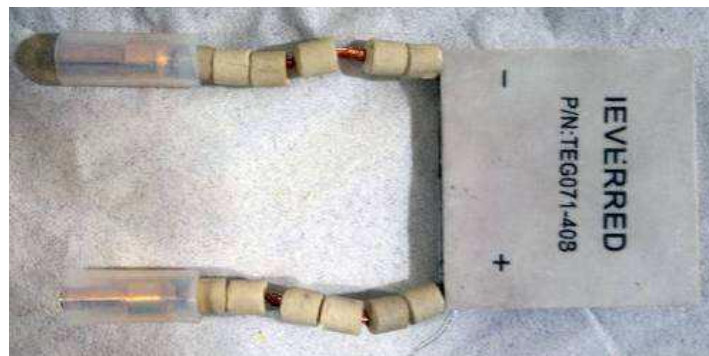
- Maggiore riflettanza della radiazione di corpo nero proveniente dall'assorbitore-emettitore;
- Massimizzare la conduzione termica con il lato caldo del modulo termoelettrico.

Il collettore presenta un piccolo "orecchio" nel quale è presente un foro passante per connettere elettricamente l'assorbitore al filo.

#### • *Modulo Termoelettrico*

Un modulo termoelettrico commerciale è stato posizionato tra il collettore e la seduta del dispositivo come parte finale del modulo di conversione stesso. Il modello scelto è stato il TEG071-40B. E' un parallelepipedo di dimensioni 40x40 mm<sup>2</sup> e spessore 4 mm.

La parte attiva del modulo è costituita da telluro di bismuto contenuta tra due lastre di allumina. La temperatura massima sopportabile dal dispositivo è di 340° C. Il modulo utilizzato è appresentato in Figura 4. 11.



**Figura 4. 11** Modulo termoelettrico

## 4.2 Prestazioni e test preliminari

Tipici risultati per tale dispositivo sono mostrati in Figura 4. 12 per un flusso incidente pari a 350 kW/m<sup>2</sup>, con funzioni lavoro per l'assorbitore e l'emettitore par a 1,8 eV e 0,9 eV, rispettivamente.

Si può notare che l'efficienza del modulo termoionico si avvicina al 30% ed è indipendente dalla temperatura del collettore, sinché questa si mantiene sotto i 350°C. Questo comportamento consente di sfruttare un modulo termoelettrico in serie senza effetti nocivi sull'efficienza dello stadio primario. La temperatura dell'assorbitore si mantiene inferiore ai 1000°C nel range ottimale di temperature del collettore.

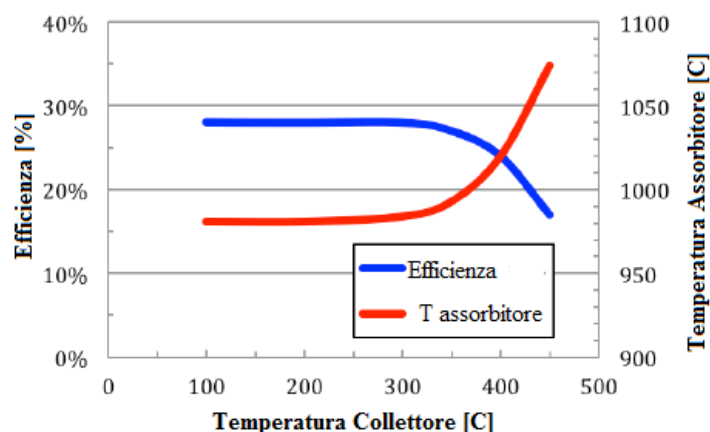
Il rendimento totale del modulo di conversione è quello tipico di un ciclo combinato:

$$\eta = \eta_{TI} + (1 - \eta_{TI})\eta_{TE} \quad (27)$$

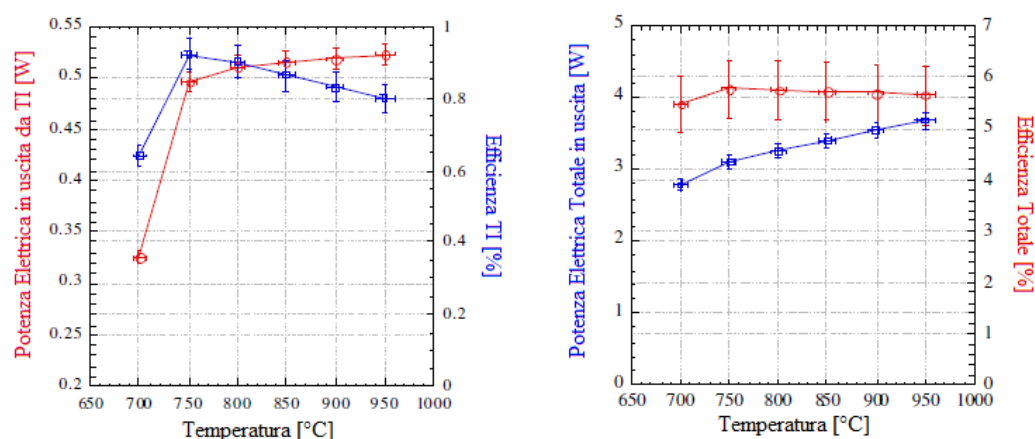
Considerando che il rendimento tipico di un modulo termoelettrico è pari al 4-6%, il rendimento totale sarà superiore al 30%.



Per valutare le prestazioni del dispositivo sono stati condotti test preliminari [11] durante i quali l'assorbitore veniva riscaldato sino ad una temperatura di 1100°C, mentre il collettore sino 500°C a partire dalla temperatura della stanza. Il dispositivo è stato testato in condizioni di vuoto spinto (pressione < 10<sup>-8</sup> Torr) e i due elettrodi erano mantenuti ad una distanza di 50µm. I risultati ottenuti in termini di potenza e rendimento dei moduli termoionico e dell'intero modulo di conversione sono riportati in Figura 4. 13.



**Figura 4. 12** Temperatura dell'assorbitore e efficienza del modulo termoionico in funzione della temperatura del collettore, per un flusso incidente pari a 350 kW/m<sup>2</sup>.



**Figura 4. 13** Potenza ed efficienza relative al modulo termoionico (sinistra); potenza ed efficienza relative a modulo termoionico più termoelettrico.

**Tabella 2** Risultati preliminari ottenuti con simulatore di energia solare concentrata

Condizioni Operative (OP)	Potenza (W)	Temperatura Assorbitore (°C)	Temperatura Collettore (°C)	Massima potenza prodotta dal TI (W)	Massima potenza prodotta dal TE (W)
OP1	138	651	416	1,42e-9	0,0185
OP2	155	700	455	4,91e-9	0,0264
OP3	220	765	541	1,24e-8	0,0425
OP4	246	817	580	2,20e-8	0,053
OP5	368	863	599	7,84e-8	0,045

Come si può notare in Fig.(sinistra) mentre la potenza prodotta cresce con la temperatura dell'emettitore, l'efficienza presenta un massimo a 750°C. I valori di rendimento del modulo termionico sono ancora bassi e questo è dovuto all'incompleta ottimizzazione dell'emettitore che produce una corrente più bassa rispetto a quella teoricamente raggiungibile. Come si può notare dalla Fig. (destra) il rendimento raggiunge valori del 6% e questo grazie al contributo del modulo termoelettrico.

Successivamente sono stati condotti ulteriori test in condizioni di flusso solare altamente concentrato su il dispositivo di tipo *Alpha*, con uno spazio interelettrodico pari a 100  $\mu\text{m}$  [8]. I risultati sono riportati in Tabella 2.

Un importante parametro da considerare è il livello di vuoto in quanto una riduzione di un ordine di grandezza del grado di vuoto provoca una riduzione di 7 ordini di grandezza della corrente prodotta dal modulo termionico.

Le basse potenze ottenute sono il risultato di condizioni operative non ottimali quali:

- Basso livello di vuoto alle alte temperature;
- Spazio interelettrodico troppo ampio e tale quindi da provocare effetti di carica negativa;
- Materiali non ottimizzati e in particolare materiale emettitore con funzione lavoro inferiore a materiale del collettore.

Per aumentare e mantenere un livello di vuoto adeguato sono stati sviluppati getters (vedi getters)

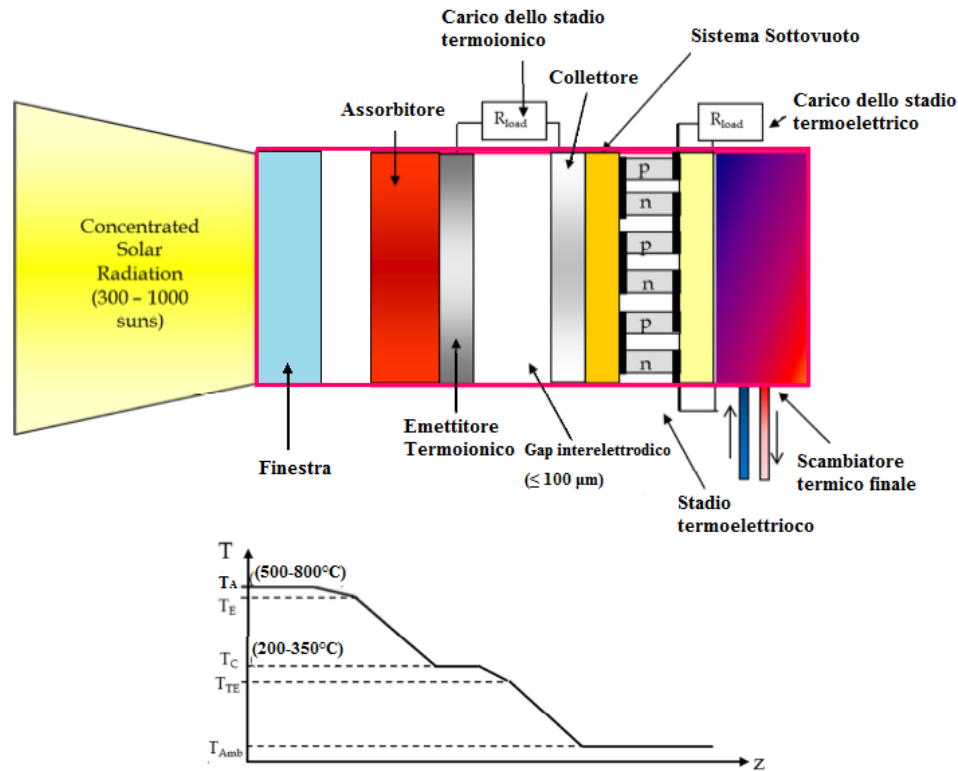
Per quanto riguarda l'ottimizzazione dei materiali, sono in corso studi per ridurre la funzione lavoro della superficie del collettore mediante la deposizione di metalli alcalini stabili.

La presente tesi si occuperà invece di indagare su diverse geometrie di distanziatori interelettrodici di spessore pari a 10 $\mu\text{m}$ . Tale distanza impedisce lo svilupparsi degli effetti di carica spaziale negativa [6].

## Capitolo 5: Equazione di Bilancio per lo scambio termico

Nel seguente capitolo si scriveranno le principali equazioni di bilancio per i componenti di maggior interesse: finestra, assorbitore, collettore e modulo termoelettrico.

Facendo riferimento alla Figura 5. 1 si può notare che un assorbitore di radiazione solare ad alta temperatura, investito da radiazione solare concentrata, alimenta tutto il dispositivo.



**Figura 5. 1** In alto, componenti principali del dispositivo di conversione; In basso, andamento della temperatura come funzione della posizione lungo l'asse longitudinale.

Il convertitore termoionico opera in condizioni di vuoto spinto ( $<10^{-5}$  mbar) e sfrutta l'elevato flusso termico fornito dall'assorbitore che si porta ad una temperatura  $T_A$  compresa tra i  $500^{\circ}\text{C}$  e i  $900^{\circ}\text{C}$ , per generare una potenza elettrica inducendo un'emissione termoionica di elettroni da un emettitore caratterizzato da bassa funzione lavoro e che si trova ad una  $T_E \sim T_A$ . Gli elettroni vengono raccolti dal collettore, caratterizzato da una funzione lavoro più bassa dell'assorbitore e che si porta ad una temperatura  $T_C$  ( $200-350^{\circ}\text{C}$ ). Il lato freddo del modulo termoelettrico è mantenuto ad una temperatura inferiore a  $120^{\circ}\text{C}$  da un dissipatore di calore in cui scorre liquido refrigerante. La potenza elettrica ottenuta è data dalla somma delle potenze ottenute dai due convertitori allo stato solido posti in serie.

Il rendimento totale del dispositivo di conversione  $\eta$  dipende dalle efficienze delle seguenti componenti:

- Concentratore ottico:  $\eta_{\text{opt}}$ ;
- Assorbitore selettivo:  $\eta_{\text{abs}}$ ;
- Stadio termoionico:  $\eta_{\text{TI}}$ ;
- Stadio termoelettrico:  $\eta_{\text{TE}}$ .

Nell'analisi affrontata si è considerato un rendimento ottico pari a 0,9.



Nelle seguenti equazioni scriviamo i bilanci di energia per la finestra Eq.(28), il catodo Eq.(29), l'anodo Eq.(30) e il modulo termoelettrico Eq.(31).

$$q_{f,irr} + q_{irr,f-amb} + q_{conv,f-amb} + q_{conv,f-d} + q_{cond,f-strut} = 0 \quad (28)$$

$$q_{ass} + q_{a,cond} + q_{a,irr} + q_E + J \cdot V_T = 0 \quad (29)$$

$$q_C + q_{c,irr} + q_{c,cond} = 0 \quad (30)$$

$$q_{in} + q_{TE,irr} + q_{conv,TE-d} + w_{out} + q_{TE,cond} = 0 \quad (31)$$

La finestra è costituita da quarzo fuso il cui comportamento è molto differente per radiazioni con una lunghezza d'onda superiore o inferiore a una lunghezza d'onda critica,  $\lambda_c = 3,5 \mu m$ . Questo comporterebbe il dover sviluppare un modello a due bande spettrali. Considerando che le temperature massime raggiunte dall'assorbitore sono intorno ai  $1000^\circ C$ , la percentuale di radiazione a cui la finestra è trasparente può essere trascurata.

I termini che compaiono nell'Eq.(28) rappresentano:

- $q_{f,irr}$ : scambio radiativo alla finestra. Tale termine comprende lo scambio tra la finestra e l'assorbitore, quello tra la finestra con la ghiera di molibdeno e quello con la flangia di supporto per la finestra. Tali flussi sono riportati nella seguente equazione, Eq.(32):

$$\begin{aligned} q_{f,irr} &= q_{irr,f-a} + q_{irr,f-g} + q_{irr,f-fl} \\ &= \varepsilon_f \varepsilon_a F_{f-a} \sigma_{SB} (T_a^4 - T_f^4) \\ &\quad + \varepsilon_f \varepsilon_g F_{f-g} \sigma_{SB} (T_g^4 - T_f^4) \\ &\quad + \varepsilon_f \varepsilon_{fl} F_{f-fl} \sigma_{SB} (T_{fl}^4 - T_f^4) \end{aligned} \quad (32)$$

Dove:

- $\sigma_{SB}$  è la costante di Stefan-Boltzmann pari a  $5,6697 \cdot 10^{-18} W/m^2 K^4$ ;
  - $T_f$  è la temperatura della finestra;
  - $T_a$  è la temperatura dell'assorbitore;
  - $T_g$  è la temperatura della ghiera;
  - $T_{fl}$  è la temperatura della flangia;
  - $\varepsilon_f$  è l'emissività della finestra;
  - $\varepsilon_a$  è l'emissività dell'assorbitore;
  - $\varepsilon_g$  è l'emissività della ghiera;
  - $\varepsilon_{fl}$  è l'emissività della flangia;
  - $F_{f-a}$  è il fattore di vista tra finestra e assorbitore;
  - $F_{f-g}$  è il fattore di vista tra finestra e ghiera;
  - $F_{f-fl}$  è il fattore di vista tra la finestra e la flangia.
- $q_{irr,f-amb}$ : scambio radiativo tra finestra e ambiente; tale contributo è esplicitato nell'Eq(33):

$$q_{irr,f-amb} = \varepsilon_f \sigma_{SB} (T_f^4 - T_a^4) \quad (33)$$

- $q_{conv,f-amb}$ : scambio convettivo tra finestra e ambiente:

$$q_{conv,f-amb} = h(T_f - T_{amb}) \quad (34)$$

Dove.:

- $h$  è il coefficiente di scambio convettivo con l'ambiente;
- $T_{amb}$  è la temperatura dell'ambiente.
- $q_{conv,f-d}$ : scambio convettivo tra finestra e dissipatore. Tale flusso è fondamentale per raffreddare la finestra e mantenerla ad una temperatura inferiore ai 150°C nella zona di contatto con lo scambiatore dove è presente una saldatura, che richiede temperature inferiori a quella sopra citata;
- $q_{cond,f-strut}$ : scambio conduttivo tra finestra e la struttura che la sostiene.

I termini introdotti nell'Eq.(29) rappresentano:

- $q_{ass}$ : flusso di calore assorbito dall'assorbitore;
- $q_{a,cond}$ : tale termine comprende lo scambio per conduzione con la struttura portante e lo scambio per conduzione attraverso i cavi.

In particolare la potenza dissipata attraverso i cavi isolati (considerando trascurabile la variazione assiale di temperatura della guaina isolante) si ottiene risolvendo il seguente sistema di Eq.(35):

$$\begin{cases} \frac{d^2\theta}{dx^2} + \omega^2\theta = \frac{\varphi(x)}{\kappa_l} \\ \theta(0) = \theta_E \\ \left(\frac{d\theta}{dx}\right)_{l_f} = 0 \end{cases} \quad (35)$$

Dove:

- $\theta = T - T_{ambiente}$ ;
- $\omega^2 = \frac{p}{S \kappa_f} \left( \frac{2\pi l_f}{\frac{1}{\kappa_f} \log\left(\frac{r_g}{r_f}\right) + \frac{1}{hr_g}} \right)$ ;
- $\varphi(x) = JV_L x$  ed è la generazione di calore interna;
- $\theta_E = T_{emettitore} - T_{ambiente}$ ;
- $\kappa_f$  è la conducibilità del cavo elettrico;
- $p$  è il perimetro esterno del filo;
- $S$  è la superficie trasversale del filo;
- $l_f$  è la lunghezza del filo;
- $r_f$  è il raggio esterno del filo;
- $r_g$  è il raggio esterno della guaina isolante;
- $h$  coefficiente di scambio convettivo con l'esterno.

L'integrale generale può essere espresso nella seguente forma:

$$\begin{aligned} \theta(x) = & C_1 \exp(\omega x) + C_2 \exp(-\omega x) \\ & + \frac{\exp(-\omega x)}{2\kappa\omega} \int_0^{l_f} \exp(\omega x') \varphi(x') dx' \\ & - \frac{\exp(\omega x)}{2\kappa\omega} \int_0^{l_f} \exp(-\omega x') \varphi(x') dx' \end{aligned} \quad (36)$$

Imponendo le condizioni al contorno si trovano le costanti  $C_1$  e  $C_2$  e quindi l'andamento della temperatura. Trovato il profilo di temperatura tramite l'Eq.(37) si ottiene il flusso di calore:

$$q_{cond-cavi} = \kappa \left( \frac{d\theta}{dx'} \right)_0 \quad (37)$$

- $q_{a,irr}$ : scambio radiativo. Tale termine tiene conto dello scambio tra l'assorbitore, la finestra e la flangia di supporto per la finestra da un lato e il distanziatore e il collettore dall'altro:

$$\begin{aligned} q_{a,irr} &= q_{irr,a-f} + q_{irr,a-fl} + q_{irr,a-ring} + q_{irr,a-coll} \\ &= \varepsilon_a \varepsilon_f F_{f-a} \sigma_{SB} (T_f^4 - T_a^4) \\ &\quad + \varepsilon_a \varepsilon_{fl} F_{a-fl} \sigma_{SB} (T_{fl}^4 - T_a^4) \\ &\quad + \varepsilon_a \varepsilon_{ring} F_{a-ring} \sigma_{SB} (T_{ring}^4 - T_a^4) \\ &\quad + \varepsilon_a \varepsilon_{coll} F_{a-coll} \sigma_{SB} (T_{coll}^4 - T_a^4) \end{aligned} \quad (38)$$

- $q_E$ : tale termine è detto tasso di raffreddamento elettronico dell'emettitore [3], è dovuto all'energia trasportata dal flusso di elettroni che abbandona l'emettitore e si deposita sul collettore ed è dato dall'Eq.(40):

$$q_E = J_E \frac{\psi_{max} - \mu_E + 2kT_E}{e} - J_C \frac{\psi_{max} - \mu_E + 2kT_C}{e} \quad (39)$$

Tale formula nel caso di assenza di effetti di carica spaziale negativa diventa:

$$q_E = J_E \frac{\phi_E + 2kT_E}{e} - J_C \frac{\phi_E + 2kT_C}{e} \quad (40)$$

Dove:

- $J_E$  è la densità di corrente fluente dall'emettitore al collettore ed è data dall'Eq.(13);
- $J_C$  è la densità di corrente fluente dal collettore all'emettitore ed è data dall'Eq.(14);
- $\phi_E$  è la funzione lavoro dell'emettitore definita dall'Eq.(15);
- $\phi_C$  è la funzione lavoro del collettore definita dall'Eq.(16);
- $k$  è la costante di Boltzmann pari a  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/K;
- $e$  è la carica dell'elettrone pari a  $1.6021 \times 10^{-19}$  C;
- $T_E$  è la temperatura dell'emettitore;
- $T_C$  è la temperatura del collettore.
- $w_{TI}$ : densità di potenza prodotta:

$$w_{TI} = J \cdot V_T \quad (41)$$

Dove:

- $J$  è la densità di corrente in uscita ed è data dall'Eq.(42):

$$J = AT_E^2 e^{-\frac{\phi_E - \phi_{ME}}{k_B T_E}} - AT_C^2 e^{-\frac{\phi_C - \phi_{MC}}{k_B T_C}} \quad (42)$$

I termini  $\phi_{ME}$  e  $\phi_{MC}$  rappresentano la barriera di potenziale aggiuntiva dovuta agli effetti spaziali di carica negativa che si vengono a creare nel gap interelettrodico.

Nel caso tali effetti possano essere trascurati, la formula diventa la seguente:

$$J = AT_E^2 e^{-\frac{\phi_E}{k_B T_E}} - AT_C^2 e^{-\frac{\phi_C}{k_B T_C}} \quad (43)$$

- $V_T$  è la differenza di potenziale finale ed è data dalla differenza di potenziale in uscita e quella sui cavi elettrici, Eq.(44):

$$V_T = V - V_L \quad (44)$$

Per il bilancio sul collettore, Eq.(30), sono stati considerati i seguenti contributi:

- $q_C$ : tasso di riscaldamento elettronico del collettore [3], è dovuto all'energia trasportata dal flusso di elettroni che abbandona l'emettitore e si deposita sul collettore ed è dato dall'Eq.(45):

$$q_C = J_E \frac{\psi_{max} - \mu_C + 2kT_E}{e} - J_C \frac{\psi_{max} - \mu_C + 2kT_C}{e} \quad (45)$$

Tale formula nel caso di assenza di effetti di carica spaziale negativa nel gap tra gli elettrodi diventa:

$$q_C = J_E \frac{\phi_C + 2kT_E}{e} - J_C \frac{\phi_C + 2kT_C}{e} \quad (46)$$

- $q_{c,irr}$ : scambio radiativo con il collettore, l'assorbitore, il distanziatore, il corpo di flangia e il modulo termoelettrico:

$$\begin{aligned} q_{c,irr} &= q_{irr,c-a} + q_{irr,c-ring} + q_{irr,c-fl} + q_{irr,c-TE} \\ &= \varepsilon_c \varepsilon_a F_{a-c} \sigma_{SB} (T_a^4 - T_c^4) \\ &\quad + \varepsilon_c \varepsilon_{ring} F_{a-ring} \sigma_{SB} (T_{ring}^4 - T_c^4) \\ &\quad + \varepsilon_c \varepsilon_{fl} F_{c-fl} \sigma_{SB} (T_{fl}^4 - T_c^4) \\ &\quad + \varepsilon_c \varepsilon_{TE} F_{c-TE} \sigma_{SB} (T_{TE}^4 - T_c^4) \end{aligned} \quad (47)$$

- $T_c$  è la temperatura del collettore;
- $T_a$  è la temperatura dell'assorbitore;
- $T_{ring}$  è la temperatura del distanziatore;
- $T_{fl}$  è la temperatura del corpo di flangia;
- $T_{TE}$  è la temperatura del modulo termoelettrico.
- $\varepsilon_c$  è l'emissività della collettore;
- $\varepsilon_a$  è l'emissività dell'assorbitore;
- $\varepsilon_{ring}$  è l'emissività del distanziatore;
- $\varepsilon_{fl}$  è l'emissività del corpo di flangia;
- $\varepsilon_{TE}$  è l'emissività del modulo termoelettrico;
- $F_{c-a}$  è il fattore di vista tra collettore e assorbitore;

- $F_{c-ring}$  è il fattore di vista tra collettore e distanziatore;
- $F_{c-fl}$  è il fattore di vista tra collettore e flangia;
- $F_{c-TE}$  è il fattore di vista tra collettore e modulo termoelettrico.
- $q_{c,cond}$ : tale termine comprende lo scambio per conduzione con il distanziatore e il lato caldo del modulo termoelettrico e lo scambio per conduzione attraverso i cavi elettrici. Per il calcolo della potenza dissipata nei fili elettrici si ripete il sistema di Eq.(35), ma sostituendo  $\theta_c = T_{collettore} - T_{ambiente}$  a  $\theta_E$  ;

Nel bilancio del modulo termoelettrico, Eq.(31), sono stati introdotti i seguenti termini:

- $q_{in}$ : flusso di calore residuo del collettore ed entrante nel modulo termoelettrico;
- $q_{TE,irr}$ : scambio per irraggiamento tra il modulo, il collettore e la flangia:

$$\begin{aligned}
 q_{TE,irr} &= q_{irr,TE-c} + q_{irr,TE-fl} \\
 &= \varepsilon_{TE}\varepsilon_c F_{TE-c}\sigma_{SB}(T_c^4 - T_{TE}^4) \\
 &\quad + \varepsilon_{TE}\varepsilon_{fl} F_{c-fl}\sigma_{SB}(T_{fl}^4 - T_{TE}^4)
 \end{aligned} \tag{48}$$

Dove:

- $T_{TE}$  è la temperatura del modulo termoelettrico;
- $T_c$  è la temperatura del collettore;
- $T_{fl}$  è la temperatura del corpo di flangia;
- $\varepsilon_{TE}$  è l'emissività del modulo termoelettrico;
- $\varepsilon_c$  è l'emissività della collettore;
- $\varepsilon_{fl}$  è l'emissività del corpo di flangia;
- $F_{TE-c}$  è il fattore di vista tra modulo termoelettrico e collettore;
- $F_{TE-fl}$  è il fattore di vista tra modulo termoelettrico e flangia.
- $q_{conv,TE-d}$ : scambio convettivo tra modulo termoelettrico e dissipatore di calore;
- $w_{out}$ : potenza prodotta;
- $q_{TE,cond-cavi}$ : scambio conduttivo attraverso i cavi elettrici. Per il calcolo di tale termine si fa riferimento al sistema di Eq.(35), sostituendo  $\theta_{TE} = T_{TE} - T_{amb}$  a  $\theta_E$ ;

Nell'analisi condotta si è deciso di non considerare lo scambio per conduzione attraverso i cavi poiché l'errore commesso nel trascurare tale contributo è inferiore rispetto all'errore commesso nel modello.

Per quanto riguarda la potenza prodotta dal modulo termoelettrico, sfruttando i dati di progetto forniti dall'azienda produttrice, si è potuta considerare il 5% del flusso entrante.

## Capitolo 6: Simulazione Numerica

### 6.1 Metodologia

Il presente elaborato consiste in uno studio preliminare con il quale si va ad analizzare diverse geometrie del distanziatore così da valutare il comportamento termico del dispositivo prima di apportare eventuali modifiche al prototipo sperimentale migliorandone le prestazioni. In particolare si è posta la concentrazione sulla forma e dimensioni del distanziatore interelettrodico. Il prototipo ad oggi testato presenta un distanziatore ad anello che distanzia gli elettrodi di  $100\mu\text{m}$ . Nel corso della tesi si è variata la forma del distanziatore, in modo tale da trovare la configurazione più vantaggiosa, e lo spessore che verrà portato a  $10\mu\text{m}$ . Tale distanza è infatti ottimale per minimizzare gli effetti di carica spaziale [6] che riducono drasticamente la potenza in uscita e l'efficienza di conversione poiché gli elettroni presenti nel gap si respingono a vicenda.

Per affrontare il problema sono stati utilizzati i programmi PTC-Creo elements 19.0 e Ansys 15.0. Si è partiti realizzando una geometria 3D con l'ausilio del programma PTC-Creo, che successivamente è stata importata in Geometry di Ansys Workbench.

L'analisi condotta con Ansys sfrutta il metodo agli elementi finiti che è una tecnica utilizzata per ottenere una soluzione approssimata delle equazioni differenziali che governano i fenomeni fisici. Tale metodo richiede che la geometria venga suddivisa in un numero finito di regioni chiamate elementi. I vertici degli elementi sono detti nodi e l'insieme degli elementi con i loro nodi è detto mesh. Per tale motivo la geometria importata in Geometry di Ansys è stata successivamente meshata.

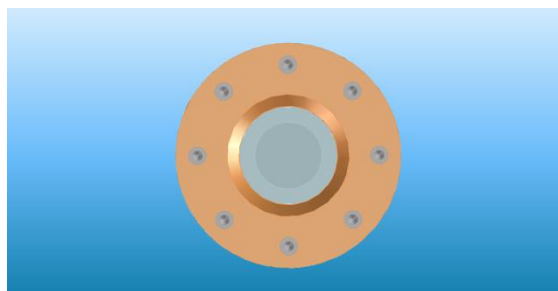
Si è condotta un'analisi preliminare con il programma Steady State Thermal del pacchetto Ansys i cui risultati sono stati utilizzati per inizializzare la successiva analisi su Fluent che tiene conto del raffreddamento ad acqua del dispositivo.

Essendo presenti flussi di calore dipendenti dalle temperature dell'emettitore e del collettore si è sfruttato un processo iterativo, che consiste nel calcolare tramite foglio Excel tali flussi sfruttando le Eq.(40), Eq.(41), Eq.(46)(45), e applicarli come condizioni al contorno in Fluent.

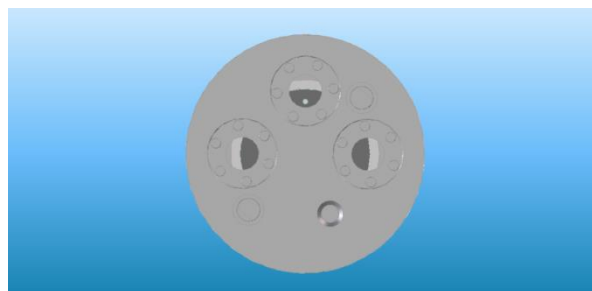
### 6.2 Impostazione della simulazione numerica

#### 6.2.1 Realizzazione CAD

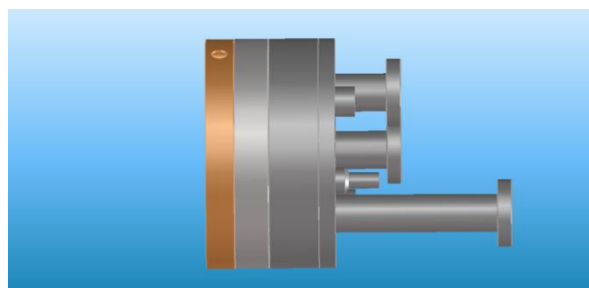
Partendo dai disegni e indicazioni fornite dal CNR si è realizzato un modello CAD 3D utilizzando il programma Creo Elements Direct 19.0. Nelle figure successive sono riportati il dispositivo nel suo complesso, la parte attiva e una versione “esplosa”.



a)

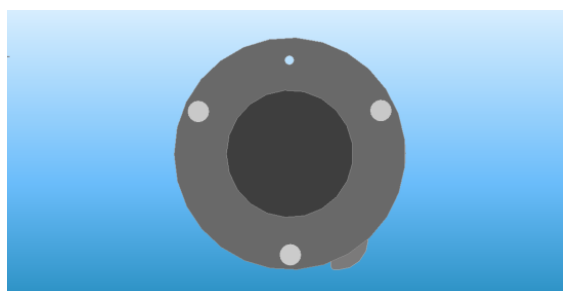


b)

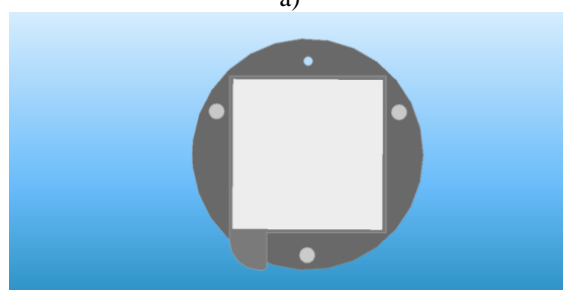


c)

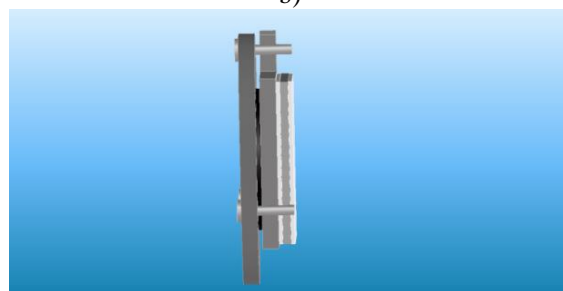
**Figura 6. 1** Dispositivo di conversione: a) vista frontale; b) vista posteriore c) vista laterale



a)

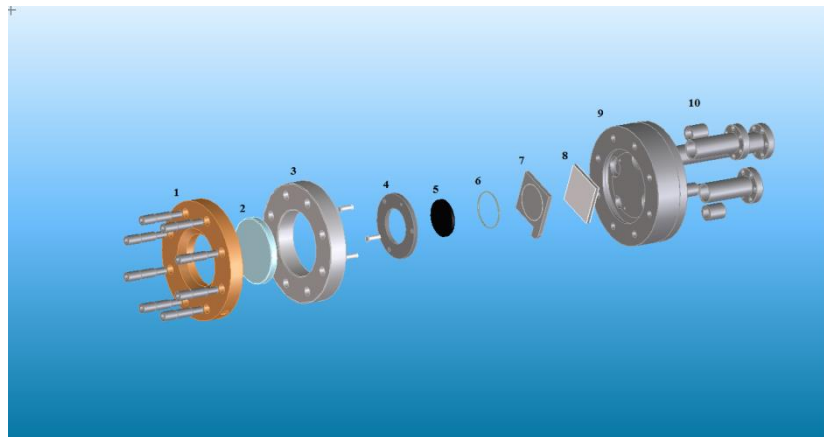


b)

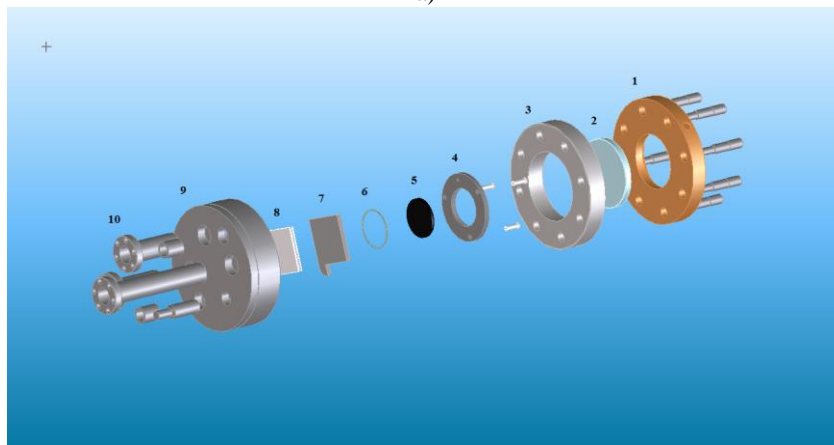


c)

**Figura 6. 2** Parte attiva del dispositivo composta da ghiera di molibdeno, assorbitore, distanziatore, collettore e modulo termoelettrico: a) vista frontale; b) vista posteriore c) vista laterale.



a)



b)

**Figura 6. 3** Versione esplosa del dispositivo: (1) Dissipatore; (2) Finestra; (3) Flangia di supporto per la finestra ; (4) Ghiera di molibdeno; (5) Assorbitore-Emettitore; (6) Anello distanziatore; (7) Collettore; (8) Modulo termoelettrico; (9) Corpo di flangia; (10) Connettori

## 6.2.2 Geometria

Il modello CAD realizzato su PTC Creo è stato importato in Geometry-DesingModeler di Ansys Workbench, dove è stata corretta e modificata per renderla conforme ad essere meshata.

I comandi utilizzati sono i seguenti:

- *Merge*: usato per unire spigoli o facce, serve per semplificare il modello in preparazione della mesh.
- *Delete*: usato per eliminare vertici e superfici e semplificare il modello di base.
- *Boolean*: può essere usato per unire, sottrarre o intersecare corpi;
- *Fill*: è usato per ricavare volumi inversi o volumi racchiusi in un corpo o più corpi;
- *Projection*: permette di proiettare punti su vertici o superfici o vertici su superfici o corpi. Tale comando è risultato utile per creare superfici di interfaccia;
- *Analysis Tools*: consiste in un insieme di funzioni che consentono di misurare la distanza tra due entità, ottenere informazioni riguardanti il corpo, come ad esempio volume e superficie, e individuare difetti nel modello.

Mediante l'utilizzo del comando *Fill* si è creata l'acqua che scorre nei due dissipatori, sono stati inoltre aggiunti due tubi di flusso in uscita per consentire lo sviluppo del flusso ed



evitare fenomeni di inversione di flusso che avrebbero comportato il rientro del fluido negli scambiatori.

Come si è scritto in precedenza, il dispositivo opera in condizione di vuoto spinto ( $<10^{-6}$  Torr), poiché su Fluent non è possibile simulare il vuoto sono stati creati due corpi chiamati “*interno-ass-coll*” e “*vuoto*” necessari per simulare il vuoto. I comandi utilizzati per creare tali corpi sono i seguenti:

- *create plane*: tale comando serve per creare un nuovo piano su cui realizzare lo schizzo;
- *sketch*: permette di creare uno schizzo di base attraverso i comandi *2D sketching* così da generare il solido desiderato;
- *Extrude*: tale comando viene utilizzato per estrarre corpi partendo da uno schizzo di base.
- *Boolean*

Le superfici di interesse sono state nominate mediante il comando *name selection* così da renderle riconoscibili in Fluent per poter impostare le condizioni al contorno e creare le interfacce.

Un esempio di schermata di *Geometry* è riportato in Figura 6. 4.

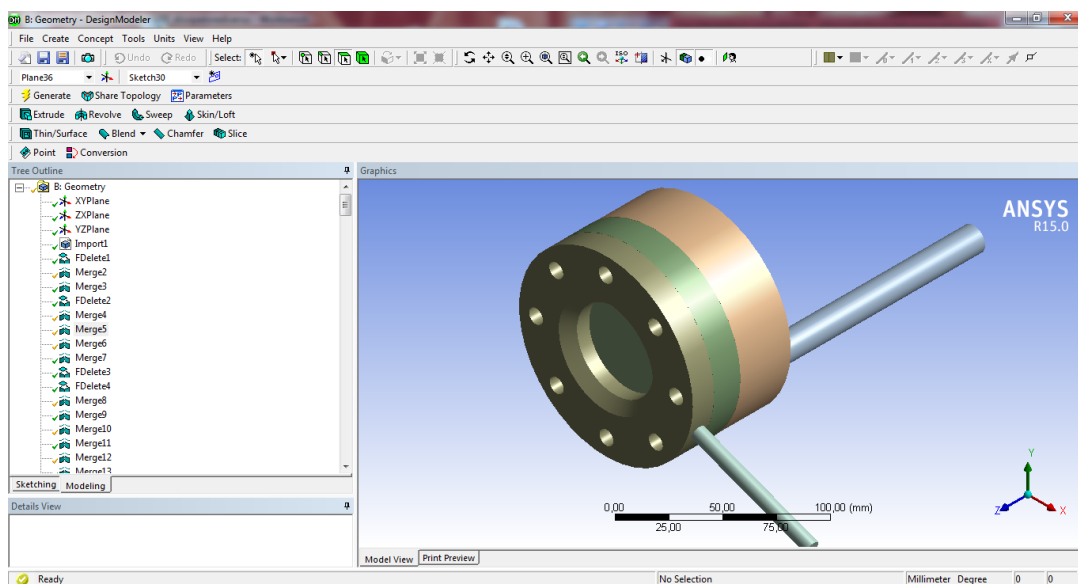


Figura 6. 4 Esempio di schermata di Geometry in Ansys Workbench

### 6.2.3 Realizzazione della Mesh

Per creare la mesh 3D è stato utilizzato il meshatore di Ansys Workbench. Data la complessità del modello non è stato possibile creare una mesh conforme, si è quindi cercato di creare mesh il più simili possibili all'interfaccia.

I tipi di mesh utilizzati sono:

- *Patch Conforming*: è una tecnica di meshatura con la quale tutte le facce di una data parte con i loro vertici e spigoli, entro un certo range di tolleranza, sono rispettate. Questo significa che la mesh aderisce nel modo più consono possibile alla faccia. Tale tipo di mesh è adatta a geometrie caratterizzate da piccoli spessori e geometria grossolana. La mesh ottenuta con il patch conforming è invariante rispetto alle condizioni al contorno, le *Named Selections* o il materiale di un oggetto. Questo implica che se uno di questi parametri viene variato non si deve meshare nuovamente il pezzo.

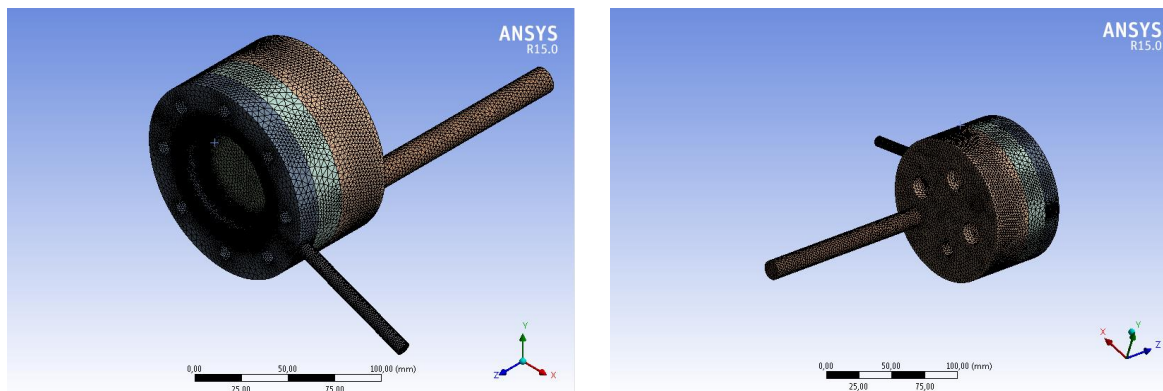
- *Sweep*: tale tipo di mesh può essere generata solo su gli “sweepable bodies”. Questo implica che se la mesh non può essere generata sul corpo il meshatore fallirà. Scegliendo tale metodo si apre il menù riportato in Figura 6. 5 con il quale si può agire sulla mesh, in particolare si può selezionare la sorgente (*Src/Trg Selection*), scegliere il tipo di mesh sulla faccia (*Free Face Mesh Type*) e decidere il numero di divisioni o la dimensioni degli elementi nella direzione dello sweep (*Type*).

Dati i piccoli volumi in gioco e la necessità di uniformare la mesh all’interfaccia sono stati utilizzati dei *sizing* localizzati così da infittire la mesh solo dove necessario.

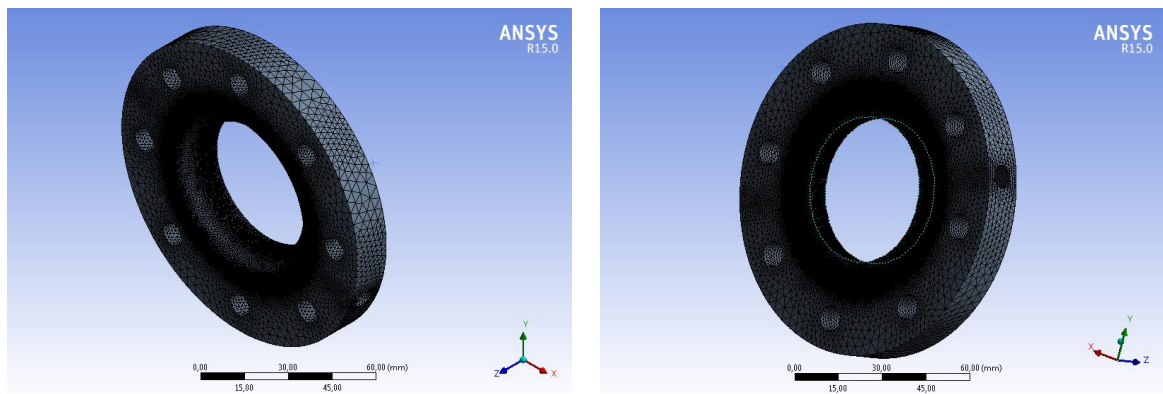
In Figura 6. 6 si può vedere la mesh relativa all’intero dispositivo, nelle figure successive si possono invece visualizzare le parti che lo compongono. Si tenga presente che la mesh delle parti a geometria invariante rimane la medesima in tutte le simulazioni fatte.

Details of "Sweep Method" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Sweep
Element Midside Nodes	Use Global Setting
Src/Trg Selection	Manual Source
Source	1 Face
Target	Program Controlled
Free Face Mesh Type	Quad/Tri
Type	Number of Divisions
<input type="checkbox"/> Sweep Num Divs	20
Sweep Bias Type	No Bias
Element Option	Solid

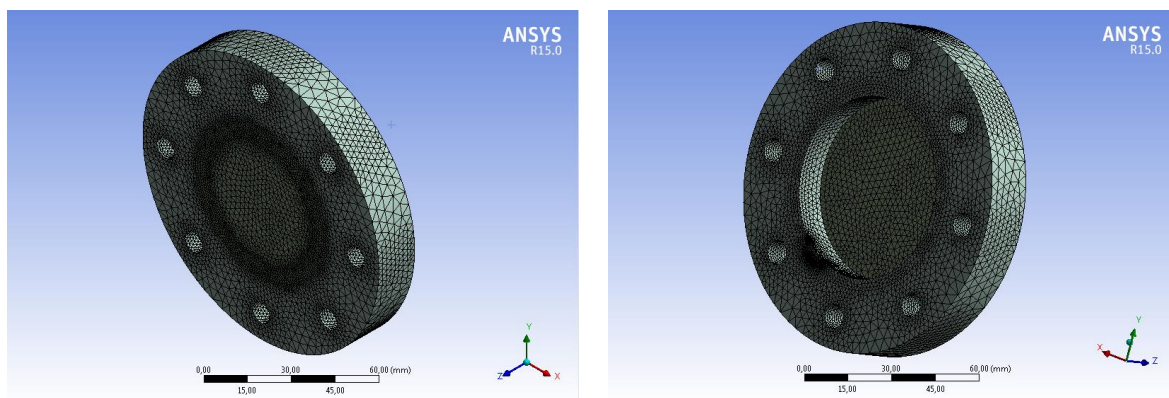
**Figura 6. 5** Opzioni relative al metodo di mesh Sweep



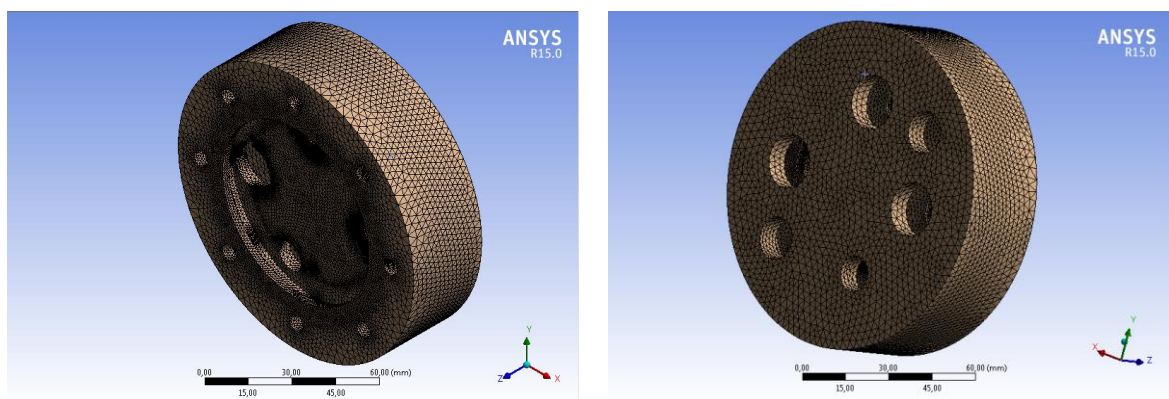
**Figura 6. 6** Mesh relativa all'intero dispositivo: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



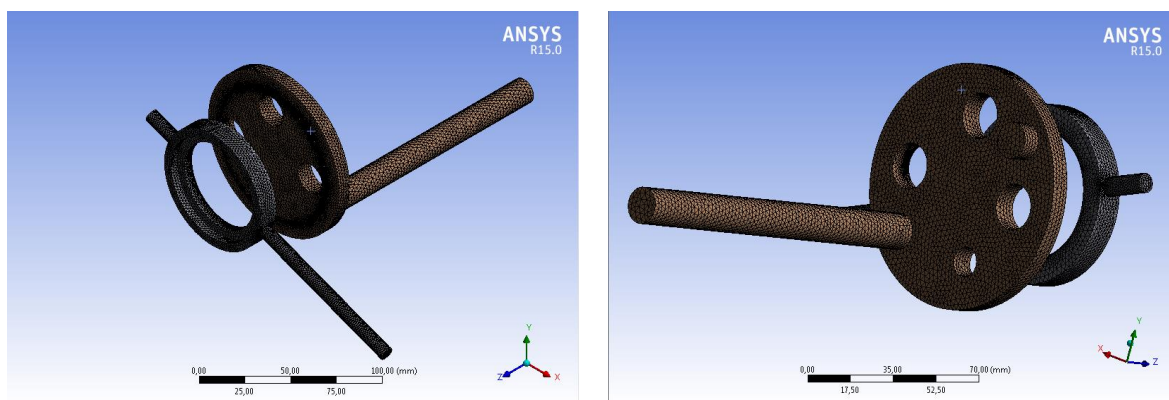
**Figura 6. 7** Mesh relativa al dissipatore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



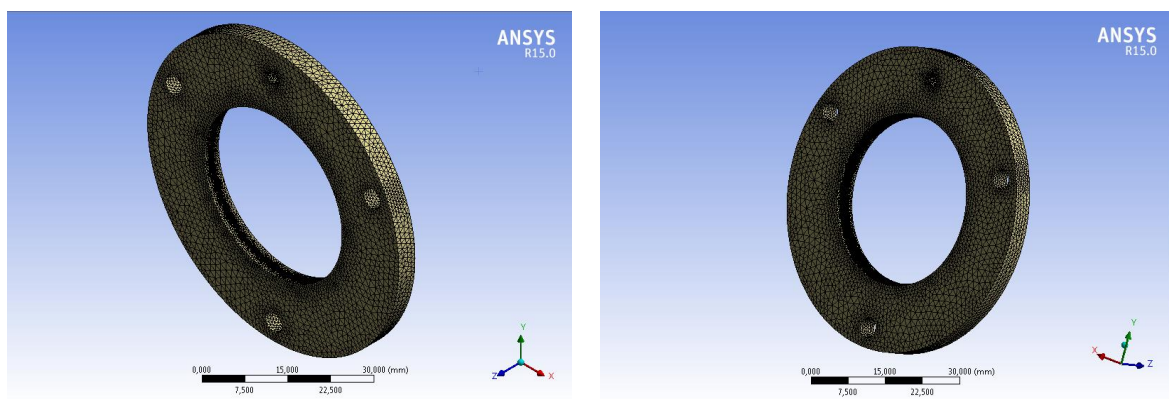
**Figura 6. 8** Mesh relativa alla Flangia di supporto per la finestra : vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



**Figura 6. 9** Mesh relativa al corpo di flangia: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra).

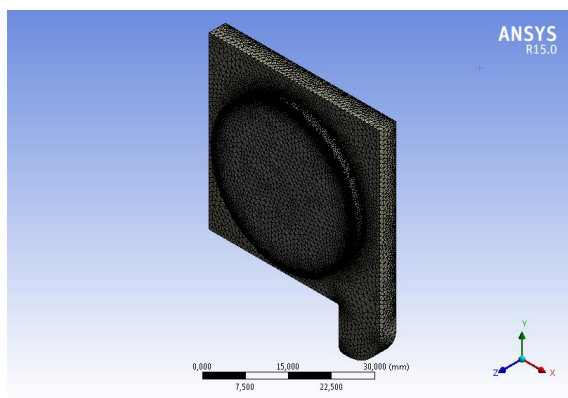


**Figura 6. 10** Mesh relativa all'acqua fluente nei due dissipatori

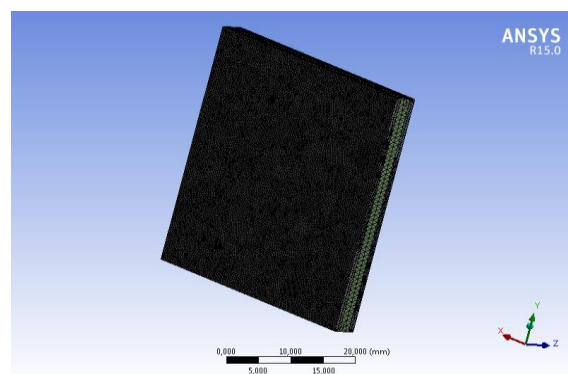
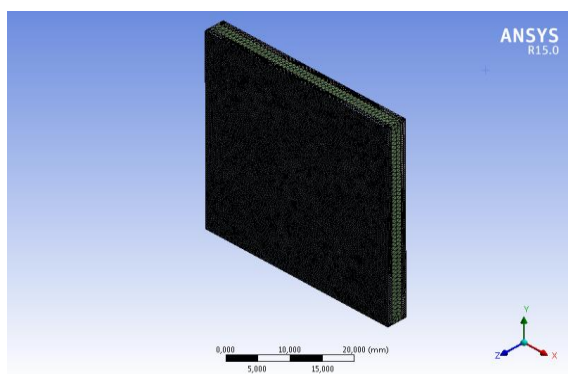


**Figura 6. 11** Mesh relativa alla ghiera di molibdeno: vista frontale (sopra), vista posteriore (sotto).

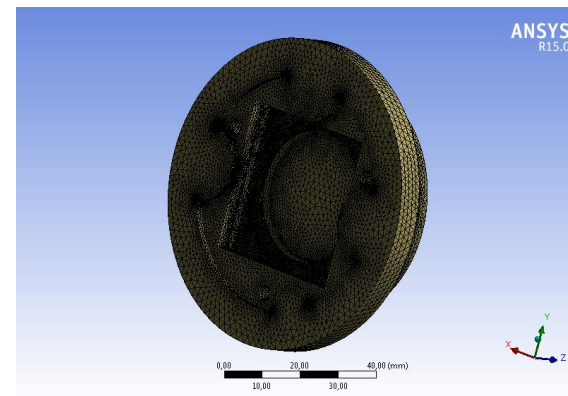
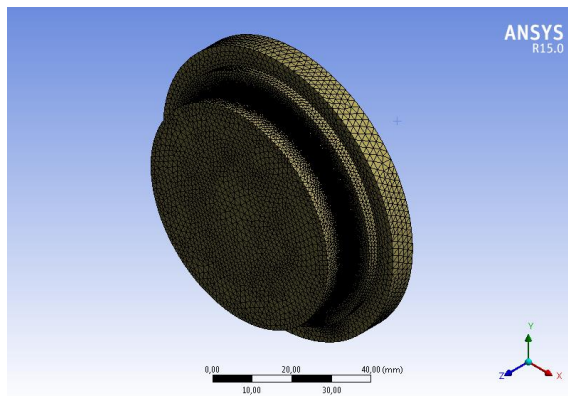




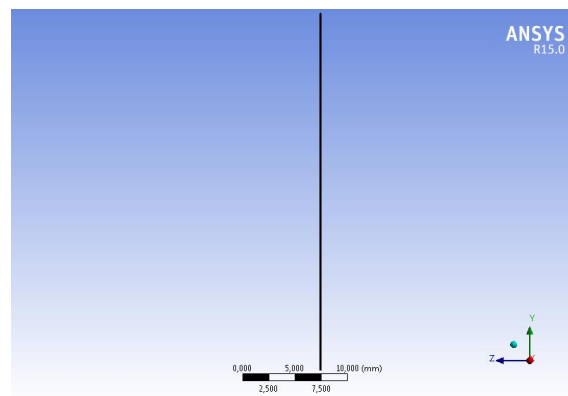
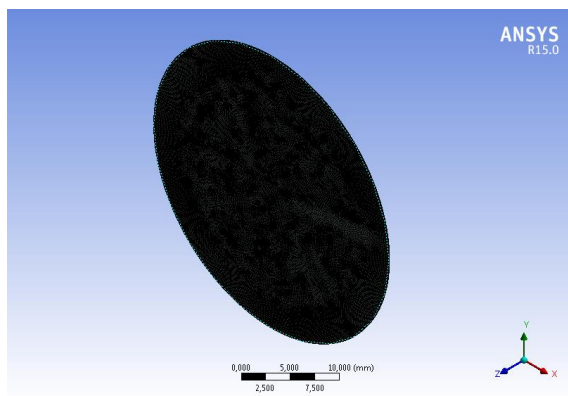
**Figura 6. 12** Mesh relativa al modulo termoionico del convertitore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



**Figura 6. 13** Mesh relativa al modulo termoelettrico del convertitore: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



**Figura 6. 14** Mesh relativa al vuoto presente nel dispositivo: vista frontale (sinistra), vista posteriore (destra)



**Figura 6. 15** Mesh relativa al vuoto interelettrodico: vista frontale (sinistra), vista laterale (destra)

## 6.2.4 Definizione dei materiali

I materiali utilizzati per l'analisi sono i seguenti:

- Acciaio inossidabile: le caratteristiche sono riportate di seguito:

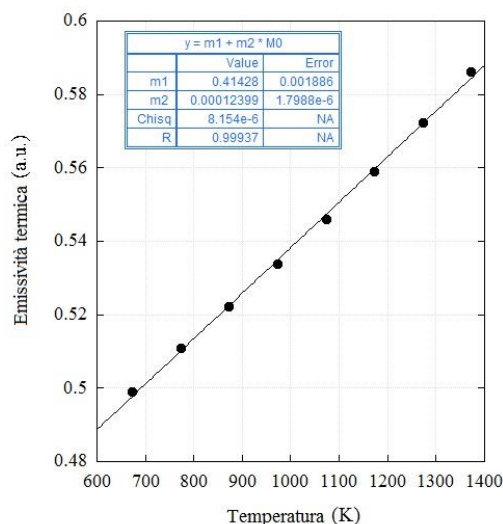
Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	8055
Calore specifico	[j/kg K]	480
Conducibilità termica	[W/m K]	$k = 0,0127 T + 14,6$
Emissività		0,2

- Allumina: le caratteristiche sono riportate di seguito:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	3960
Calore specifico	[j/kg K]	850
Conducibilità termica	[W/m K]	
$k = 1,67809e-11 T^4 - 9,71035e-08 T^3 + 2,09154e-04 T^2 - 2,01232e-01 T + 7,99887e+01$		
Emissività		0,4

- Carburo di afnio: le caratteristiche sono riportate di seguito:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	1170
Calore specifico	[j/kg K]	
Conducibilità termica	[W/m K]	$k = 12 T + 11$
Emissività		Vedi Figura 6. 16



**Figura 6. 16** Andamento dell'emissività del carbuto di afnio con la temperatura

- Molibdeno: le caratteristiche sono riportate di seguito:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	10220
Calore specifico	[j/kg K]	251
Conducibilità termica	[W/m K]	
$k = 9,33037e-06 T^2 - 5,00087e-02 T + 1,52392e+02$		
Emissività		0,07

- Rame: le caratteristiche sono riportate di seguito:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	8978
Calore specifico	[J/kg K]	381
Conducibilità termica	[W/m K]	
	$k = -0,0683 T + 420,64$	
Emissività		0,07

- Telluro di bismuto: le caratteristiche sono riportate di seguito:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	7750
Calore specifico	[J/kg K]	160
Conducibilità termica	[W/m K]	
	$k = 0,375 T + 1,125$	
Emissività		0,45

## 6.2.5 Steady State Thermal

Si è utilizzato Steady State Thermal per condurre un'analisi preliminare semplificata, in quanto si è trascurata la presenza di acqua fluente nei dissipatori. I risultati ottenuti da tale analisi vengono utilizzati per inizializzare le simulazioni su Fluent così da agevolare la convergenza e per avere un termine di paragone.

L'analisi condotta su Steady State Thermal può essere sfruttata per determinare temperature, gradienti di temperatura e flussi termici dovuti a carichi termici costanti nel tempo.

La base per l'analisi termica condotta in Steady State Thermal è l'equazione di bilancio del calore ottenuta dal principio di conservazione dell'energia. Il solutore, che sfrutta il metodo agli elementi finiti, calcola la temperatura dei nodi e utilizza tali temperature per ottenere altre quantità termiche. Il programma considera le tre principali modalità di scambio: conduzione, convezione ed irraggiamento.

Per un'analisi di questo tipo il sistema risolto è il seguente:

$$[K(T)]\{T\} = \{Q(T)\} \quad (49)$$

Dove:

- $[K(T)]$  è la conducibilità dei materiali che può dipendere o no dalla temperatura;
- $\{Q(T)\}$  è il calore scambiato per conduzione e può dipendere o no dalla temperatura;
- $\{T\}$  è la temperatura del corpo, in particolare le temperature fissate a priori rappresentano vincoli per il sistema.

Per iniziare l'analisi è necessario specificare le proprietà dei materiali coinvolti in *Engineering Data*, in particolare l'unica proprietà richiesta è la conducibilità termica.

Dopo aver specificato la temperatura iniziale, a cui è stato dato un valore di 20°C, si sono impostate le condizioni al contorno.

Le condizioni al contorno disponibili sono le seguenti:

- *Heat Flow*: tale condizione può essere applicata a vertici, spigoli e superfici e ha come unità di misura energia/tempo.

- *Heat Flux*: tale condizione è applicabile solo su superfici e ha come unità di misura energia/tempo/area. E' stata utilizzata per specificare il flusso termico entrante nel dispositivo.
- *Internal Heat Generation*: la generazione interna di calore è una condizione applicabile esclusivamente a corpi e ha come unità energia/tempo /volume.
- *Temperature*: con tale condizione si può imporre una temperatura ad un vertice, uno spigolo, una superficie o un corpo. Tale condizione è stata sfruttata per imporre la temperatura degli scambiatori all'interfaccia con l'acqua.
- *Convection*: tale condizione viene sfruttata quando è presente uno scambio di tipo convettivo e può essere applicata esclusivamente a superfici. L'equazione che sta alla base di tale scambio è la seguente:

$$q_c = hA(T_{superficie} - T_{ambiente}) \quad (50)$$

Dove:

- $h$  è il coefficiente di scambio convettivo e deve essere specificato dall'utente. Può essere costante o dipendente dalla temperatura o dallo spazio;
- $A$  è l'area di scambio;
- $T_{superficie}$  è la temperatura della superficie del corpo ed è determinata dal programma;
- $T_{ambiente}$  è la temperatura dell'ambiente e deve essere specificata dall'utente.
- *Radiation*: tale condizione viene selezionata quando è presente uno scambio di tipo radiativo. Impostando tale condizione è possibile scegliere l'opzione *To Ambient* se la superficie irraggia verso l'ambiente o *Surface to Surface* se la superficie fa parte di una cavità, che è identificata dall'*Enclosure number*.

Nel caso di scambio con l'ambiente l'equazione di base è la seguente:

$$q_R = \sigma \varepsilon A (T_{superficie}^4 - T_{ambiente}^4) \quad (51)$$

Dove:

- $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann;
- $\varepsilon$  è l'emissività del materiale;
- $A$  è l'area radiante.

Nel caso di cavità costituita da N superfici il bilancio per ciascuna superficie è dato dall'Eq.(52) [22] dove la perdita di energia è correlata con la temperatura del corpo:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - \frac{F_{ji}(1 - \varepsilon_i)}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} Q_i = \sum_{i=1}^N (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma T_i^4 \quad (52)$$

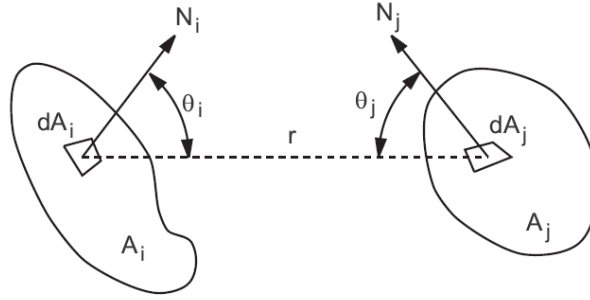
Dove:

- $N$  è il numero di superfici radianti;
- $\delta_{ji}$  è il delta di Kronecker;
- $\varepsilon_i$  è l'emissività della superficie;
- $F_{ji}$  è il fattore di vista;
- $A_i$  è l'area della superficie radiante;
- $Q_i$  è l'energia scambiata relativa alla superficie  $i$ ;
- $T_i$  è la temperatura della superficie.

- *Perfectly Insulated*: tale condizione serve per specificare le superfici adiabatiche.

Come si può notare i carichi e i coefficienti necessari per l'analisi variano in funzione del tempo che è sfruttato come parametro di monitoraggio. Nel caso quindi di analisi statica il tempo rappresenta semplicemente un contatore che identifica gli step e i sottostep.

Per il calcolo dei fattori di vista viene sfruttato il metodo dell'Emicubo. Con il termine fattore di vista si intende la frazione di energia totale radiante che lascia la superficie i-esima e che arriva direttamente sulla superficie j-esima. La formula è data dall'Eq.(53) che fa riferimento alla Figura 6. 17.

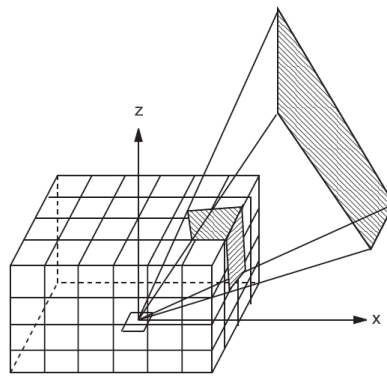


**Figura 6. 17** Schema di superfici radianti

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (53)$$

Dove :

- $A_i$  e  $A_j$  sono le aree delle superfici i e j;
- $r$  è la distanza tra le superfici infinitesime i e j;
- $\theta_i$  è l'angolo tra la normale alla superficie infinitesima i,  $N_i$ , e  $r$ ;
- $\theta_j$  è l'angolo tra la normale alla superficie infinitesima j,  $N_j$ , e  $r$ ;



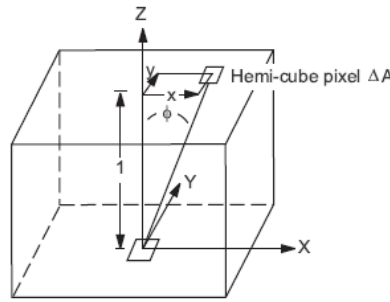
**Figura 6. 18** Emicubo

Per quanto riguarda il metodo di calcolo, il metodo dell'Emicubo si basa sull'analogia dell'emisfera di Nusselt. Tale analogia dimostra che qualsiasi superficie, che copre la medesima area sull'emisfera, ha lo stesso fattore di vista. Da questa assunzione è evidente che qualsiasi superficie geometrica intermedia può essere usata senza variare i fattori di vista. In questo metodo, anzi che proiettare su di una sfera, viene costruito un cubo



immaginario attorno al centro della patch ricevente. Un patch in un modello a elementi finiti corrisponde ad una elemento di una faccia per una superficie radiante facente parte di una cavità. L'ambiente viene trasformato in modo tale da porre il centro del patch nell'origine degli assi con la sua normale coincidente con l'asse z positivo. In questo modo si viene a creare un cubo immaginario come quello riportato in Figura 6. 18. Le facce sono poi suddivise in pixel quadrati e l'ambiente circostante viene proiettato sulle cinque facce planari, come riportato in Figura 6. 18.

Viene definito un delta di fattore di vista,  $\Delta F_j$ , per ogni pixel sul cubo. Se due patch differenti proiettano la loro area sullo stesso pixel, viene condotta un'analisi di profondità per valutare quale sia il patch più vicino. Dopo aver determinato quale patch j-esimo è visibile sull'emicubo, la somma dei delta fattori di vista per ciascun pixel occupato dal patch j-esimo determina il fattore di vista dal patch i-esimo posto al centro dell'emicubo al patch j-esimo. Questa operazione viene ripetuta per tutti i j-esimo patch.



**Figura 6. 19** Ottenimento dei delta di fattori di vista per il Metodo dell'Emicubo

A questo punto l'emicubo è posizionato attorno al centro di un altro patch e il procedimento prima descritto viene ripetuto per tutti i patch. Il fattore di vista complessivo per ciascuna superficie è dato dall'Eq.(54):

$$F_{ij} = \sum_{n=1}^N \Delta F_n = \frac{\cos\phi_i \cos\phi_j}{\pi r^2} \Delta A_j \quad (54)$$

Dove:

- N è il numero di pixel;
- $\Delta F$  è il delta di fattore di vista per ciascun pixel.

Una volta risolto il problema impostato è possibile visualizzare i valori di temperatura e flusso. I risultati ottenuti per ogni caso affrontato verranno riportati nel capitolo successivo.

## ▪ Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno imposte sono le seguenti:

- Sull'involucro è stata impostata una condizione di scambio convettivo con l'esterno, che si trova ad una temperatura di 20°C, con un coefficiente di scambio pari a 20 W/m<sup>2</sup>K;
- Sull'involucro è stata impostata una condizione di scambio radiativo con l'ambiente. Ad ogni superficie è stata assegnata la propria emissività;
- Sulle pareti interne dei due scambiatori è stata impostata una condizione di temperatura pari a 15°C;
- Sulla superficie dell'assorbitore rivolta verso la finestra è stata impostata una

- condizione di flusso termico entrante;
- Sulle pareti interne al dispositivo sono state impostate condizione di scambio radiativo di tipo “surface to surface” e ad ogni superficie è stata assegnata la propria emissività.

### 6.2.6 Ansys Fluent

Fluent è un software usato per modellare fenomeni fluidodinamici e scambi di calore in geometrie complesse. Gli step per risolvere un problema in Fluent sono i seguenti:

- Definizione degli obiettivi del modello;
- Creazione della geometria e della griglia;
- Impostazione del solutore e dei modelli fisici;
- Calcolo e monitoraggio della soluzione;
- Valutazione e salvataggio dei risultati.

#### • Modelli ed equazioni costitutive

Per poter affrontare l’analisi termica del dispositivo, essendo presenti fenomeni di conduzione, irraggiamento e fluidodinamici sono stati attivati i modelli Energy, Surface-to-Surface (S2S) e Realizable k-epsilon.

Per simulare lo scambio radiativo è stato scelto il modello S2S in quanto è il più adatto per casi in cui il mezzo non partecipa allo scambio. Il modello Surface-to-Surface può essere usato per simulare lo scambio radiativo in una cavità composta da superfici grigie e diffuse, in cui il mezzo che separa le superfici non influenza lo scambio radiativo. Per superfici grigie l’emissività e il coefficiente di assorbimento monocromatici sono indipendenti dalla lunghezza d’onda della radiazione. Per la legge di Kirchoff emittenza monocromatica è uguale al coefficiente di assorbimento monocromatico ( $\varepsilon = \alpha$ ). Per una superficie diffusa le sue proprietà sono indipendenti dalla direzione, quindi riflette l’energia incidente da una direzione in modo uguale in tutte le direzioni.

In accordo con il modello di corpo grigio, se una certa radiazione (E) raggiunge una superficie, una parte verrà riflessa ( $\rho E$ ), una assorbita ( $\alpha E$ ) e una trasmetta ( $\tau E$ ). Dato che nella maggior parte delle applicazioni le superfici sono opache alla radiazione termica (nell’infrarosso), la quantità trasmessa può essere trascurata ( $\tau = 0$ ).

Il modello Realizable k-epsilon è stato scelto in quanto indicato come il più adatto dalla letteratura.

Le equazioni costitutive alla base del problema sono le seguenti:

- Continuità:  
L’equazione di conservazione di massa è scritta di seguito:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (55)$$

Dove:

- $\rho$  è la densità;
- $\vec{v}$  è il vettore velocità.
- Quantità di moto:

L'equazione di conservazione della quantità di moto è riportata di seguito:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (56)$$

Dove:

- $p$  è la pressione statica;
- $\rho \vec{g}$  è la forza gravitazionale;
- $\vec{F}$  rappresenta forza esterne al corpo.

- Energia:

L'equazione di conservazione dell'energia è la seguente:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (57)$$

Dove:

- $k_{eff}$  è la conducibilità effettiva;
- $\vec{J}_j$  è il flusso di diffusione della specie j-esima;
- $k_{eff} \nabla T$  rappresenta l'energia trasferita per conduzione;
- $\sum_j h_j \vec{J}_j$  rappresenta la diffusione delle specie;
- $(\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})$  rappresenta il termine di dissipazione viscosa;
- $S_h$  include il termine di sorgente radiativo.

Nell'Eq.(57) il termine E è pari a:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (58)$$

- Equazioni di trasporto per il modello Realizable k-  $\epsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \end{aligned} \quad (60)$$

Dove:

- $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$  con  $\eta = S \frac{k}{\epsilon}$  ed  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ;
- $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$  è la generazione di energia cinetica turbolenta dovuta ai gradienti di velocità medie;
- $G_b$  è la generazione di energia cinetica turbolenta dovuta al galleggiamento ed è definita come:

$$G_b = \beta g_i \frac{u_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

dove  $\beta$  è il coefficiente di espansione termica,  $g_i$  è la componente lungo la  $i$ -esima direzione del vettore dell'accelerazione gravitazionale e  $Pr_t$  è il numero di Prandtl turbolento che di default è preso pari a 0,85.

- $Y_M$  è il termine di dissipazione per dilatazione, rappresenta l'influenza della compressibilità sulla turbolenza ed è definita come:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2$$

dove  $M_t$  è il numero di Mach.

- $C_2$  e  $C_{1\varepsilon}$  sono costanti;
- $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  sono i numeri di Prandtl turbolenti per  $k$  ed  $\varepsilon$ ;
- $S_K$  e  $S_\varepsilon$  sono termini di sorgente;
- $\mu_t$  è la viscosità turbolenta.

- Equazioni relative al modello S2S:

Il flusso di energia che lascia una superficie è costituito da energia emessa direttamente ed energia riflessa. L'energia riflessa dipende dal flusso di energia che le arriva da ciò che la circonda, che può essere espresso in termini di flusso che abbandona le altre superfici, come si può notare in Eq.(63). Il flusso uscente dalla superficie  $i$ -esima è dato dalla seguente equazione:

$$q_{out,i} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i q_{in,i} \quad (61)$$

La quantità di energia incidente su di una superficie dipende dal fattore di vista  $F_{ji}$ , definito dall'Eq.(62).

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_j} \int_{A_i} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} \delta_{ij} dA_i dA_j \quad (62)$$

$$q_{in,i} = \sum_{j=1}^N F_{ij} q_{out,j} \quad (63)$$

Sostituendo l'Eq.(63) nell'Eq.(61) si ottiene:

$$q_{out,i} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + \rho_i \sum_{j=1}^N F_{ij} q_{out,j} \quad (64)$$

## • Materiali

I materiali di interesse per l'analisi sono stati creati ed assegnati ad ogni componente. Oltre a quelli già citati nel Paragrafo 6.2.4 sono stati aggiunti i seguenti materiali:

- Acqua: le cui proprietà fisiche sono quelle fornite dal programma:

Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	998,2
Calore specifico	[J/kg K]	4182
Conducibilità termica	[W/m K]	0,6
Viscosità	[kg/m s]	0,001003

- Vuoto: Poiché il dispositivo opera in condizioni di vuoto spinto, per poter simulare il suo comportamento su Fluent si è reso necessario creare un materiale fittizio dalle scarse proprietà conduttive e capacitive. Le caratteristiche assegnategli sono le seguenti:

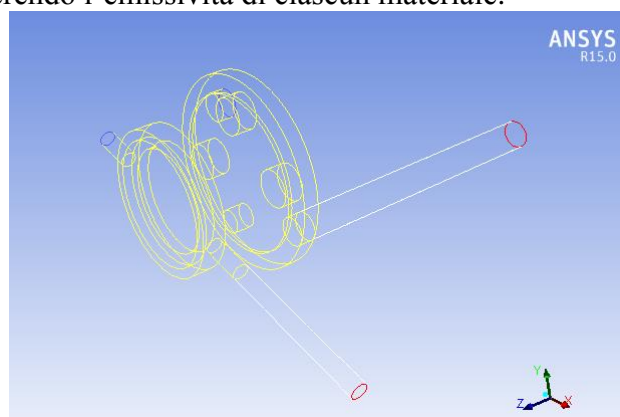
Densità	[kg/m <sup>3</sup> ]	0,001
Calore specifico	[j/kg K]	1e-09
Conducibilità termica	[W/m K]	1e-30
Viscosità	[kg/m s]	1e-09

Per quanto riguarda i “componenti” a cui è stato assegnato il vuoto come materiale sono state anche attivate le opzioni *Laminar Zone* e *Fixed Values* nella sezione *Cell Zone Conditions*. L’opzione *Fixed Values* dà la possibilità di fissare valori di velocità lungo l’asse x, y e z, valori di energia cinetica turbolenta, di tasso di dissipazione turbolenta e di temperatura. Tali valori sono stati fissati a zero ad eccezione della temperatura che è stata fissata al valore di inizializzazione pari a 288 K. Dopo l’inizializzazione è stata inoltre assegnata una pressione pari a -101324,9999 attraverso la funzione *patch*.

### • Condizioni al contorno

Per quanto riguarda le condizioni al contorno si sono impostate le seguenti condizioni;

- *mass flow inlet* all’ingresso dei due scambiatori ad acqua, Figura 6. 20 linee blue, con una portata di ingresso pari a 0,01 kg/s e una temperatura di 15°C, da dati forniti dal CNR.
- *pressure outlet* all’uscita degli scambiatori, Figura 6. 20 linee rosse
- *wall* di tipo *mixed* sulla superficie del dispositivo interfacciante con l’esterno. Tale condizione implica uno scambio di tipo sia radiativo che convettivo con l’ambiente che si trova ad una temperatura di 20°C e con un coefficiente di scambio convettivo pari a 20 W/m<sup>2</sup>K. Ad ogni superficie è stata assegnata la propria emissività.
- *Interface* di tipo *coupled* sulle superfici interne al dispositivo. Per quanto riguarda le superfici interfaccianti con il vuoto è stato impostato uno scambio di tipo radiativo inserendo l’emissività di ciascun materiale.



**Figura 6. 20** Condizioni al contorno per l'acqua all'interno degli scambiatori

Il flusso in ingresso al dispositivo è stato assegnato alla superficie dell’assorbitore rivolta verso la finestra. Il valore di tale flusso è stato variato a partire da un fattore di concentrazione pari a 300 soli sino ad arrivare ad un valore pari a 700 soli.

Per quanto riguarda i flussi dipendenti dalle temperature dell’emettitore e del collettore, essi sono stati calcolati alla fine di ogni simulazione e imposti come condizioni al

contorno sulle superfici di interfaccia create tra l'assorbitore e lo spazio interelettrodico e di interfaccia tra il collettore e lo spazio interelettrodico.

La condizione di generazione di potenza del modulo termoelettrico è stata invece calcolata come il 5-6% del flusso di calore entrante nel modulo e imposta come flusso volumetrico uscente dal modulo.

### • Solutore e Modelli attivati

Il solutore scelto è di tipo *pressure based* e il tempo è settato su stazionario.

Per quanto riguarda i modelli si è scelto il metodo *Coupled* per l'accoppiamento pressione velocità con l'opzione *pseudo transient* attiva, in quanto è un modello più robusto e particolarmente indicato per analisi di tipo stazionario. Tale algoritmo risolve le equazioni del momento e continuità contemporaneamente. Per la discretizzazione spaziale sono stati scelti gli algoritmi *Least Squares Cell Based* per i gradienti, *PRESTO!* per la pressione, *First Order Upwind* per il momento, l'energia cinetica turbolenta e il tasso di dissipazione turbolento e il *Second Order Upwind* per l'energia.

Scegliendo l'algoritmo *Least Squares Cell Based* si assume che la soluzione vari linearmente e che la variazione dei valori tra due celle adiacenti sia la seguente:

$$(\nabla\phi)_{c0} \cdot \Delta r_i = (\phi_{ci} - \phi_{c0}) \quad (65)$$

Dove  $\phi_{c0}$  è il valore nel centro della cella  $c0$ ,  $\phi_{ci}$  è il valore nella cella  $ci$  e  $\Delta r_i$  è la distanza tra i due centroidi.

Attivando il *First Order Upwind* le quantità relative alle celle sono determinate assumendo come valore dell'intera cella quello presente nel centro della cella.

Attivando il *Second Order Upwind* si ottiene un'accuratezza maggiore attraverso un'espansione in serie di Taylor della soluzione nel centro della cella.

## 6.3 Analisi di sensibilità dalla mesh

Per ogni caso affrontato è stata condotta un'analisi di sensibilità sulla mesh. Tale analisi consiste nell'aumentare o ridurre il numero di elementi della mesh agendo sul parametro *relevance*. Tale parametro può essere variato da un valore di -100 a un valore di +100, ottenendo rispettivamente soluzioni con maggiore velocità o più accurate.

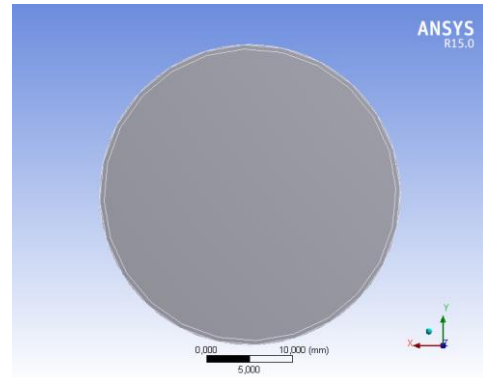
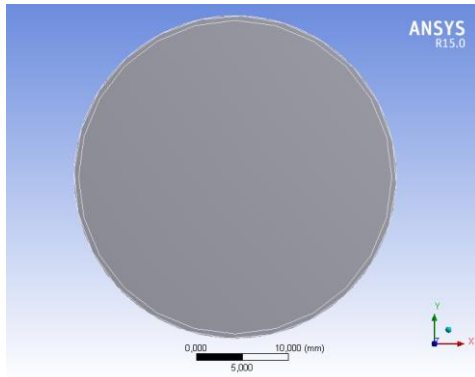
Per ogni caso si è scelta quella mesh con una *relevance* minima, oltre la quale non si otteneva più una variazione apprezzabile dei risultati.

## 6.4 Casi analizzati

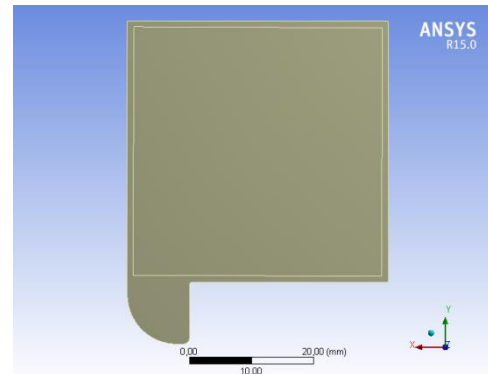
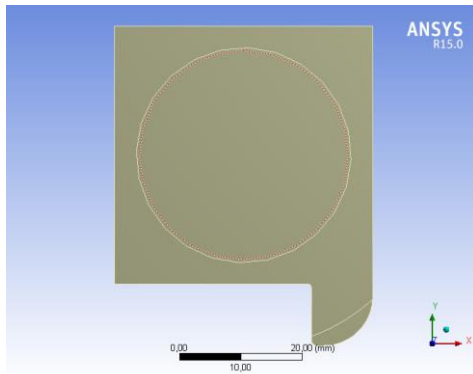
In tutti i casi analizzati la geometria dell'assorbitore e del collettore rimane invariata. Il componente che varia in forma e dimensioni è il distanziatore interelettrodico.

### 6.4.1 Distanziatore ad anello da 100 $\mu\text{m}$

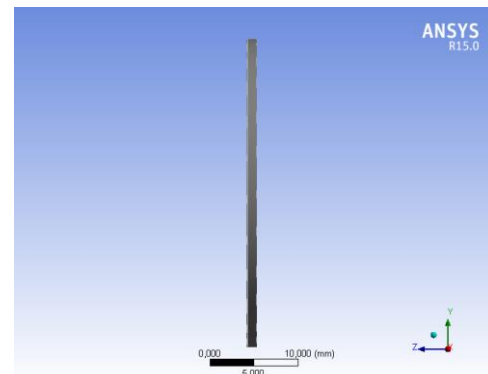
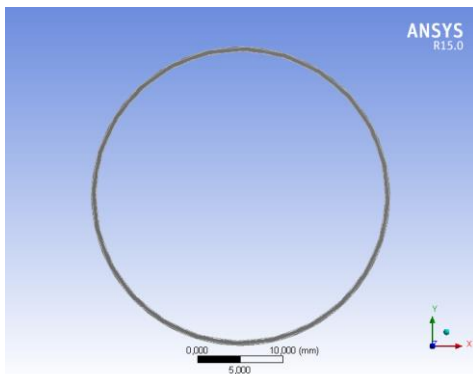
Di seguito si riportano le immagini relative all'assorbitore, emettitore e distanziatore ad anello.



**Figura 6. 21** Assorbitore vista frontale (sinistra) e posteriore (destra)



**Figura 6. 22** Collettore vista frontale (sinistra) e posteriore (destra)



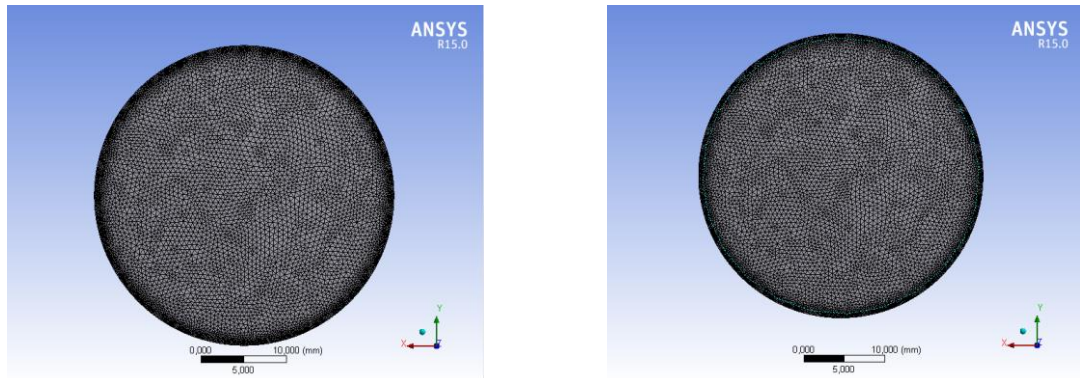
**Figura 6. 23** Distanziatore a forma di anello vista frontale (sinistra) e laterale (destra)

L'anello distanziatore presenta una superficie di contatto con l'assorbitore pari a  $55\text{mm}^2$ , con un diametro esterno di 35 mm e uno interno di 34, e distanza i due elettrodi di  $100\text{ }\mu\text{m}$ .

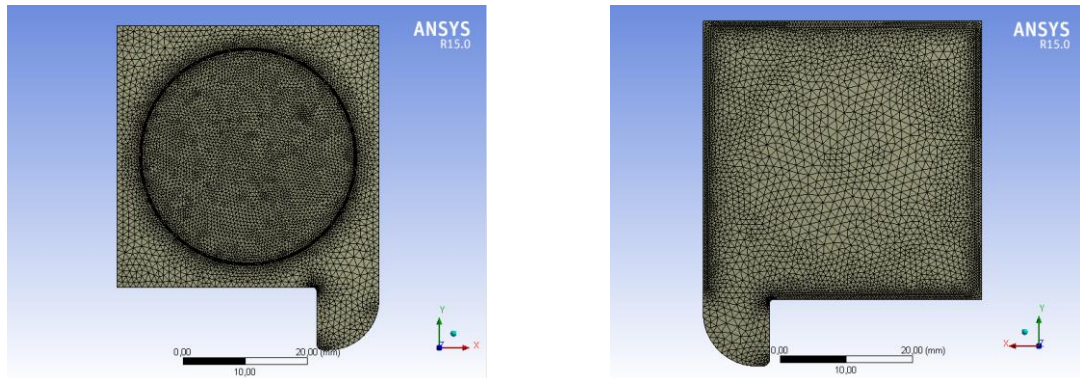
Per la realizzazione della mesh si sono usati tali componenti sfruttando il metodo *Patch Conforming* e si sono aggiunti *sizing* nelle zone di interesse, in particolare:

- Sizing da 0,2 mm sulla superficie del distanziatore di interfaccia con l'assorbitore;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con la ghiera di sostegno;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con il gap interelettrodo;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con il l'anello distanziatore;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con il gap interelettrodo;
- Sizing di 1 mm sulla superficie laterale del collettore.

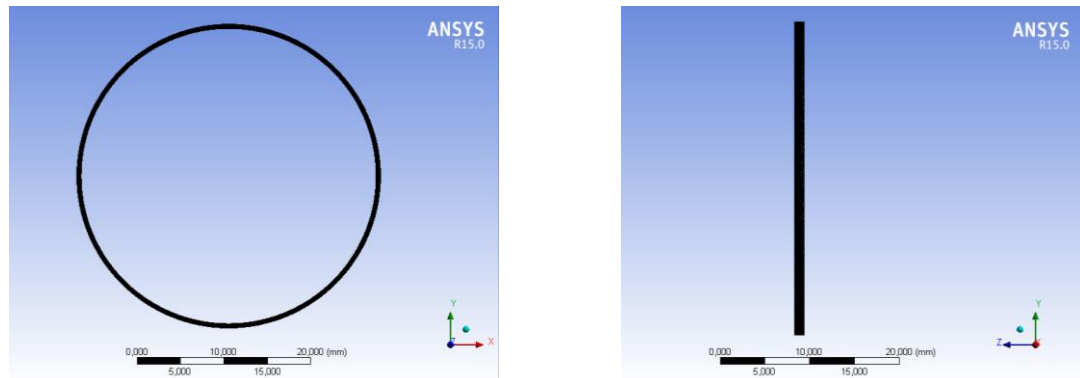
La mesh ottenuta per tali elementi è riportata in Figura 6. 24, Figura 6. 25 e Figura 6. 26.



**Figura 6. 24** Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 25** Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 26** Distanziatore meshato vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)

Per quanto riguarda i fenomeni coinvolti da considerare nell'analisi con Fluent si deve tenere presente che in questo caso si risente degli effetti negativi di carica spaziale dovuti allo spessore del gap interelettrodico. Tale fenomeno limita fortemente il flusso di elettroni come spiegato nel Capitolo 3.2. E' quindi stato possibile trascurare i contributi legati al tasso di raffreddamento e riscaldamento elettronico. Per poter calcolare la densità di corrente e la potenza elettrica prodotta dal modulo termoionico è necessario conoscere l'andamento del potenziale nel gap interelettrodico. Si è sfruttato un programma di calcolo scritto con *Wolfram Mathematica* che consente di calcolare la densità di corrente tenendo conto degli effetti di carica spaziale. Tale programma si basa sulla teoria di Langmuir sulla distribuzione di velocità degli elettroni emessi [5]. I dati di ingresso al programma sono le temperature medie delle superfici attive dei due elettrodi, le dimensioni del gap interelettrodico (in questo caso 100  $\mu\text{m}$ ), le funzioni lavoro dei materiali dei due elettrodi rispettivamente 1,7 eV per lo strato di diamante CVD emettitore, depositato



sull'assorbitore di carburo di afnio e 1eV per il molibdeno con rivestimento superficiale che compone il collettore e i valori delle costanti di Richardson rispettivamente pari a 33,4 A/cm<sup>2</sup>K<sup>2</sup> per lo stato di diamante CVD e 60 A/cm<sup>2</sup>K<sup>2</sup> per il molibdeno.

#### 6.4.2 Distanziatore ad anello da 10 µm

Rispetto al caso precedente varia solo la geometria dell'anello distanziatore che presenta uno spessore tale da distanziare i due elettrodi di 10 µm.

Per la mesh si è utilizzato il metodo *Patch Conforming* con i seguenti *sizing* nelle zone di interesse:

- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con la ghiera di sostegno;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con in vuoto dal lato finestra;
- Sizing di 0,1 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con il distanziatore;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con il vuoto interelettrodo;
- Sizing di 1 mm sulla superficie laterale del collettore;
- Sizing di 0,04 mm sulla superficie del distanziatore di interfaccia con l'assorbitore.

In Figura 6. 27, Figura 6. 28, Figura 6. 29 sono riportate le mesh relative ai tre elementi.

Per quanto riguarda i fenomeni da considerare nell'analisi termica, in questo caso la distanza interelettrodoica è tale da poter trascurare gli effetti di carica spaziale, detrimenti per le prestazioni del dispositivo. Di conseguenza sono state utilizzate le Eq. (40), (41), (43) e (46) per calcolare i contributi del raffreddamento e riscaldamento elettronico e la potenza prodotta dal modulo termoionico.

Tali flussi sono stati calcolati mediante l'ausilio di un foglio *Microsoft Excel* inserendo i valori di temperature medie ottenute sulle pareti emettenti e riceventi.

Un esempio di tabella Excel usata è riportato nelle seguenti tabelle.

**Tabella 3** Esempio di foglio *Excel* per calcolo dei flussi elettronici

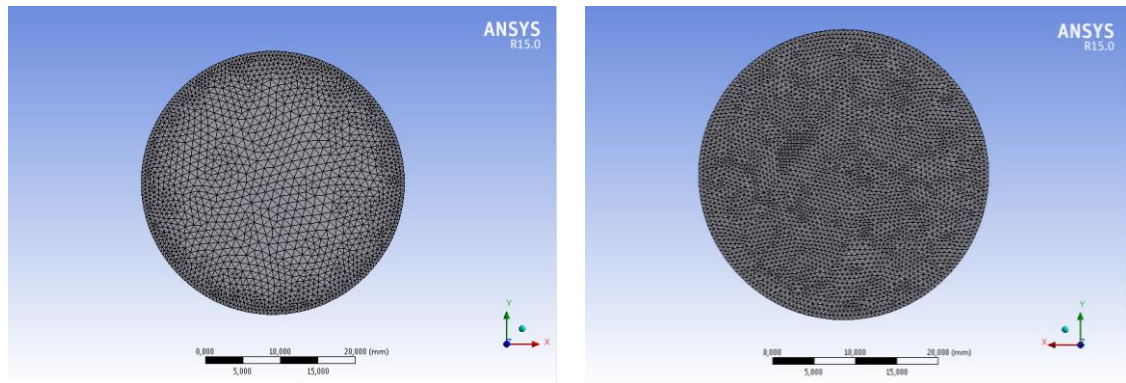
N°iter	T_E	T_C	Area attiva	Area attiva	Fi_E	Fi_C	ΔV	k	A_E	A_E	A_c	A_c
	K	K	mm <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	eV	eV	V	eV/K	A/cm <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	A/cm <sup>2</sup> K <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>
1			907,92	9,08e-04	1,7	1	0,7	0,00008617	33,4	3,34e+05	60	6e+05

J_EC	J_CE	J	w=J*V	Q_E	Q_C	Q_emettitore	Q_emettitore	Q_collettore
A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>3</sup>	W/m <sup>3</sup>
						=-Q_E - w	=(Q_E-w)*1e-06	=Q_C*1e-06

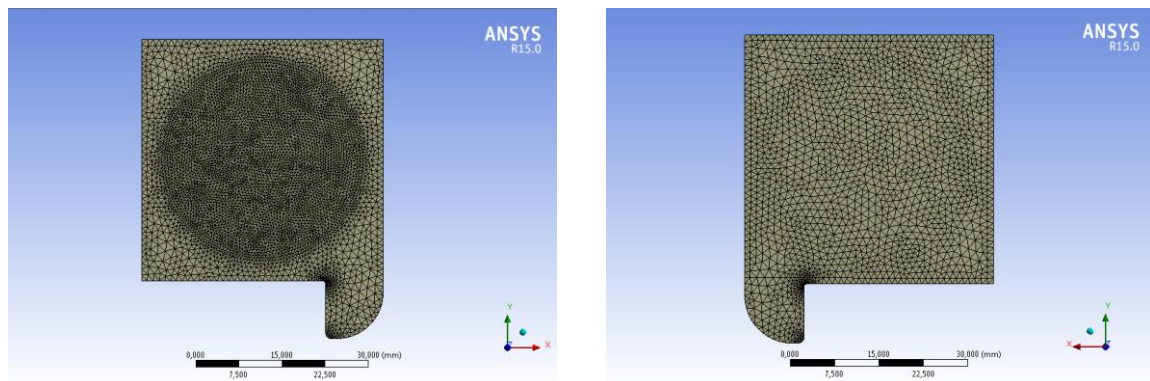
Dove:

- $k$  è la costante di Boltzmann;
- $A$  è la costante di Richardson;
- $Fi_e$  e  $Fi_c$  sono le funzioni lavoro rispettivamente dell'emettitore e del collettore;
- $J_{EC}$  è dato dall'Eq.(13);
- $J_{CE}$  è dato dall'Eq.(14);
- $J = J_{EC} - J_{CE}$ ;
- $Q_E$  è il raffreddamento elettronico ed è dato dall'Eq.(40);
- $Q_C$  è il riscaldamento elettronico ed è dato dall'Eq.(46);

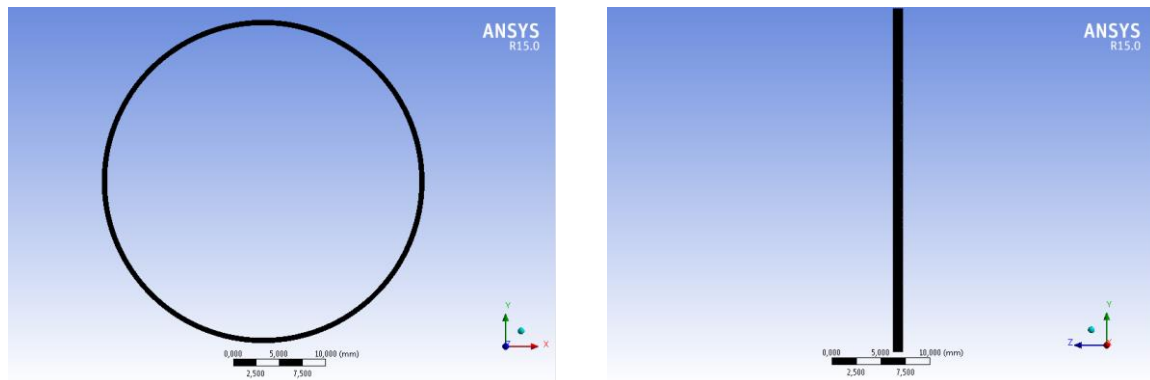
I flussi vengono imposti sulle superfici di interfaccia con il gap interelettrodico come flussi volumetrici, specificando uno spessore di volume pari a 0,001 mm.



**Figura 6. 27** Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 28** Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 29** Distanziatore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)

### 6.4.3 Maschera da 10 $\mu\text{m}$

Questa geometria è costituita da 220 colonnine collocate su tutta la superficie dell'assorbitore. Ogni singola colonna ha base quadrata e superficie pari a  $0,25\text{mm}^2$ . La superficie totale di contatto tra i due elettrodi è di conseguenza pari a  $55\text{mm}^2$ , uguale a quella dell'anello distanziatore. Le colonnine sono distanziate di 2 mm l'una dall'altra e hanno uno spessore (i.e. altezza) di  $10\mu\text{m}$ . Le immagini relative alla geometria

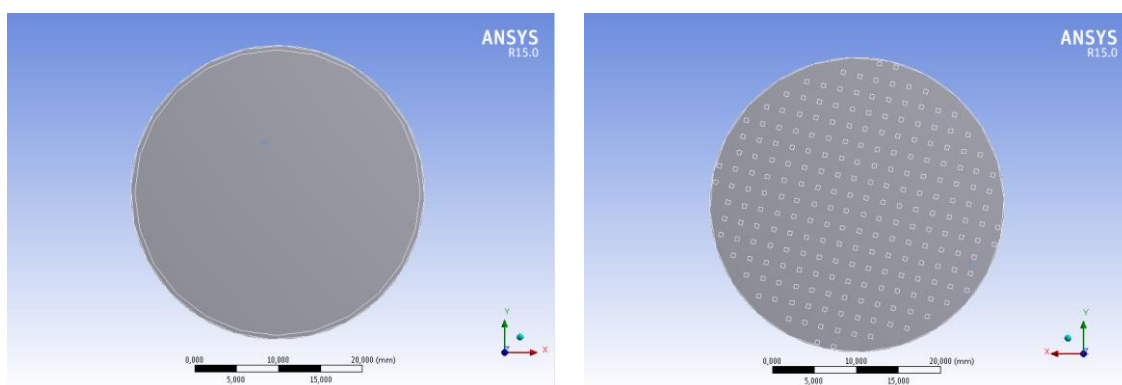
dell'assorbitore, del collettore e distanziatori sono riportate in Figura 6. 30, Figura 6. 31 e Figura 6. 32.

Per la realizzazione della mesh si sono usati di tali componenti si è sfruttato il *metodo Patch Conforming* per l'assorbitore e il collettore e lo *Sweep* per i distanziatori, si sono aggiunti i seguenti *sizing* nelle zone di interesse:

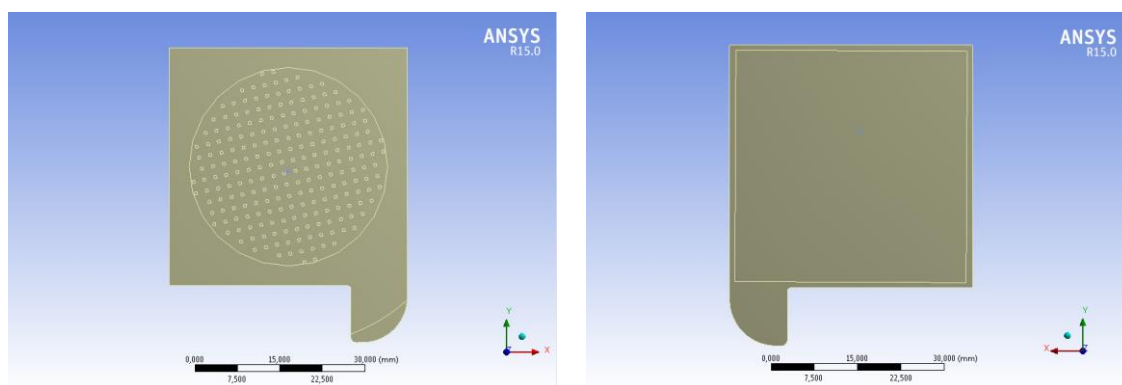
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con la ghiera di sostegno;
- Sizing di 0,31 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con i distanziatori;
- Sizing di 0,31 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con i distanziatori;
- Sizing di 1 mm sulla superficie laterale del collettore.

La mesh ottenuta per tali elementi è riportata in Figura 6. 33, Figura 6. 34 e Figura 6. 35.

I fenomeni da considerare nell'analisi dipendenti dal flusso elettronico sono i medesimi considerati nel caso del distanziatore ad anello di spessore 10  $\mu\text{m}$ . Le formule e le tabelle *Excel* utilizzate per il calcolo dei flussi restano invariate rispetto a tale caso.



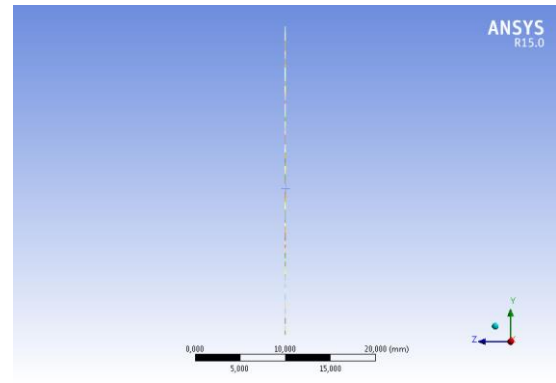
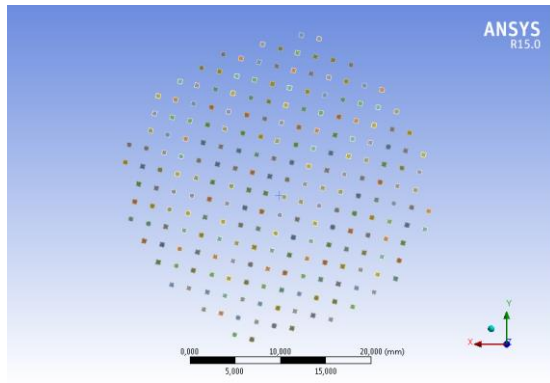
**Figura 6. 30** Assorbitore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



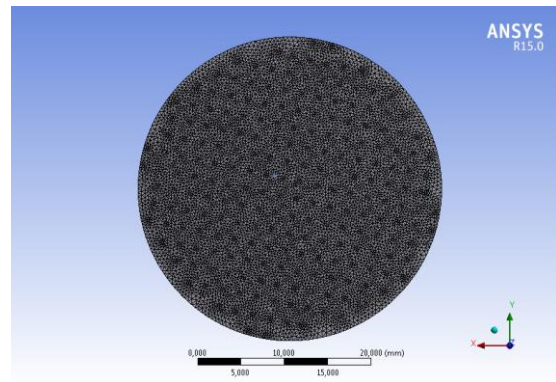
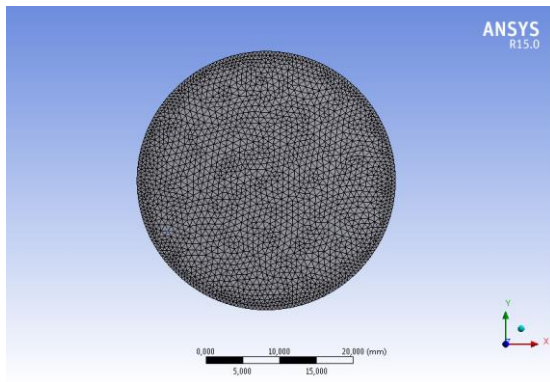
**Figura 6. 31** Collettore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)

Tale geometria è stata realizzata su richiesta del CNR in quanto assicurerebbe maggiore stabilità dal punto di vista strutturale e a essa potrebbe esser facilmente connessa una riduzione di superficie di contatto. A differenza dei precedenti distanziatori, posizionati in una seduta ricavata nel collettore, le micro-colonne verrebbero realizzate mediante deposizione selettiva del materiale direttamente sull'assorbitore.

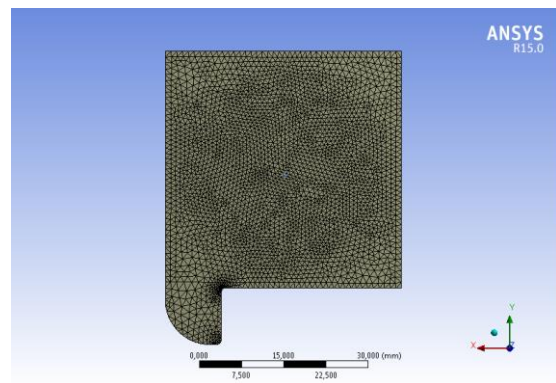
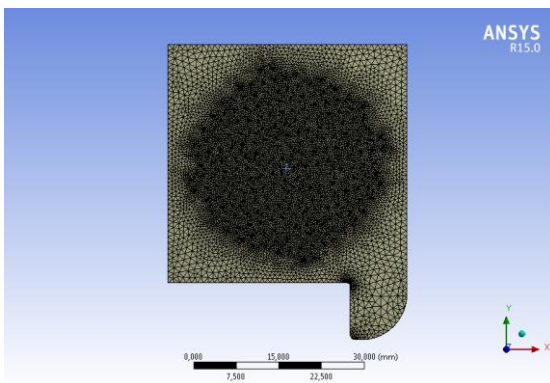
La deposizione per polverizzazione (*sputtering deposition*) è una tecnica PVD (*Physical-Vapour-Deposition*) che consente di crescere un sottile strato di materiale su un determinato substrato. Il processo fisico alla base è il seguente: gli atomi polverizzati dal bersaglio (solo una piccola parte di tutti gli atomi polverizzati), mediante un bombardamento di ioni, raggiungono il substrato con elevata energia, depositando un sottile film in accordo con il tasso di crescita che dipende dai parametri di processo.



**Figura 6. 32** Distanziatori vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)



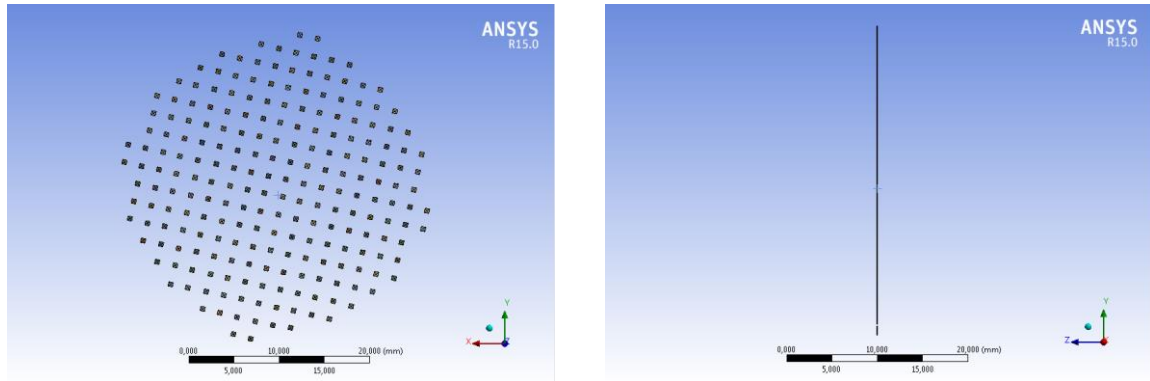
**Figura 6. 33** Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



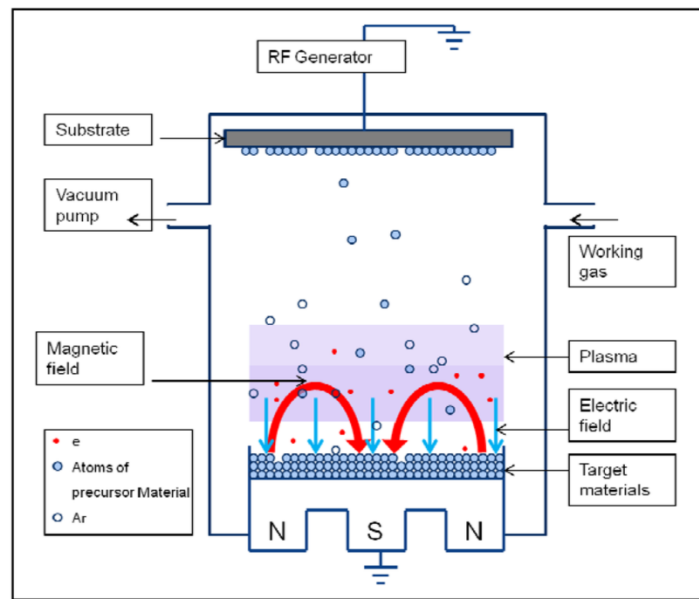
**Figura 6. 34** Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)

Il bombardamento di ioni è dovuto all'azione di un plasma indotto sul gas introdotto nella camera di *sputtering*, tipicamente un gas inerte, da forti campi elettromagnetici prodotti da una sorgente a radiofrequenza. I parametri che possono essere variati per agire sul tasso di crescita e sulle proprietà fisiche dello strato sono molti, ad esempio la pressione del gas di sputtering, la potenza del generatore di radiofrequenza o la temperatura del substrato.

Per quanto riguarda la deposizione di allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) si sfrutta uno sputtering di tipo reattivo. In questo particolare tipo di deposizione il film sottile cresce attraverso una reazione chimica tra il materiale del target (Alluminio Al) e il gas (ossigeno  $\text{O}_2$ ) introdotti nella camera di processo. La composizione dello strato è controllata principalmente variando il tasso di pressione relativa tra Argon (gas inerte) e l'ossigeno. Uno schema del processo di deposizione è mostrato in Figura 6. 36.



**Figura 6. 35** Distanziatori meshati vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)



**Figura 6. 36** Schema del processo di deposizione per polverizzazione

#### 6.4.4 Distanziatori da 10 $\mu\text{m}$

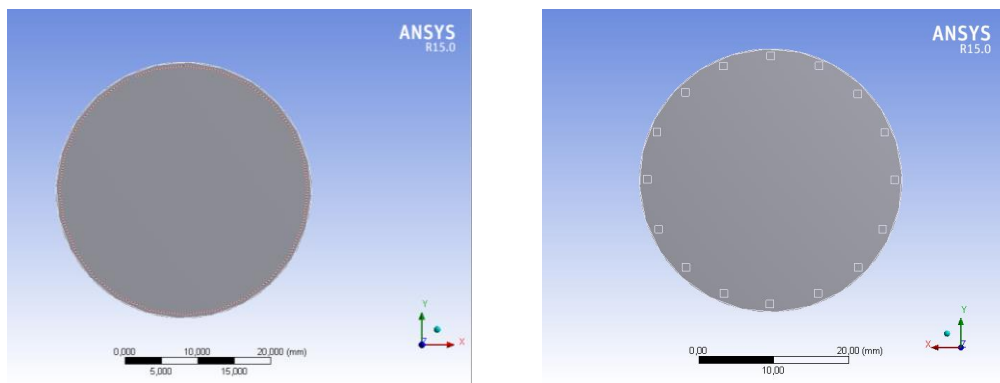
Tale geometria nasce dall'idea di ridurre la superficie di contatto tra distanziatori ed assorbitore e distanziatori e collettore, aumentando così l'area attiva, garantendo però una stabilità strutturale che, in base alle prestazioni ottenute dalla presente analisi, andrà testata in un secondo studio. Il distanziatore consiste in 16 colonnine di base quadrata con lato 1,5 mm e area totale pari a 40 mm<sup>2</sup> con spessore di 10  $\mu\text{m}$  posizionate come in Figura 6. 39.

Le immagini relative ad assorbitore, collettore e distanziatori sono riportate in Figura 6. 37, Figura 6. 38 e Figura 6. 39.

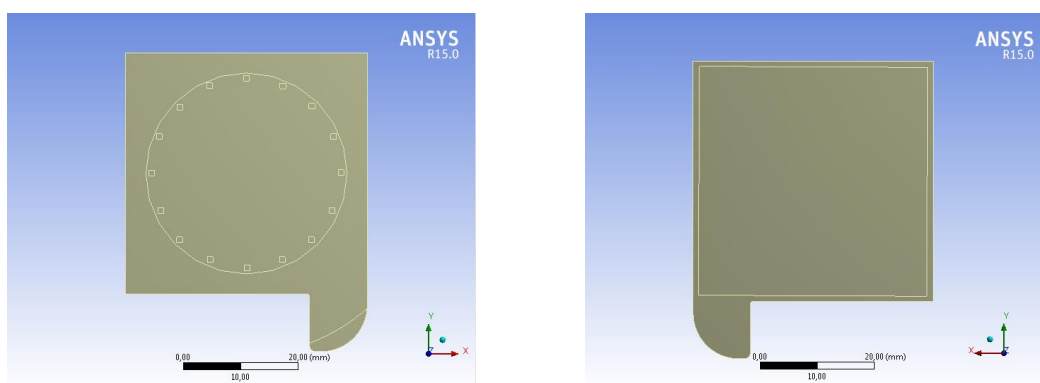
Per la mesh si è sfruttato il metodo *Patch Conforming* per l'assorbitore e il collettore e lo *Sweep* per i distanziatori con i seguenti *sizing* nelle zone di interesse:

- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con la ghiera di sostegno;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie dell'assorbitore di interfaccia con il vuoto interelettrodico;
- Sizing di 1 mm sulla superficie laterale del collettore;
- Sizing di 0,5 mm sulla superficie del collettore di interfaccia con lo spazio interelettrodico;

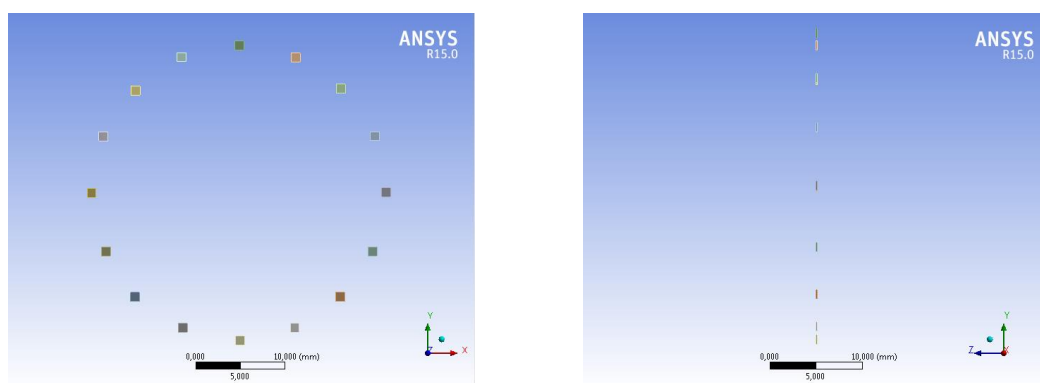




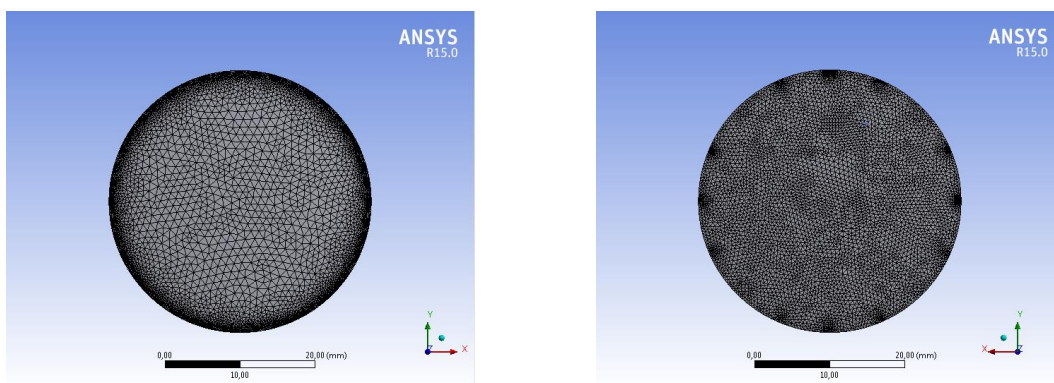
**Figura 6. 37** Assorbitore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 38** Collettore vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



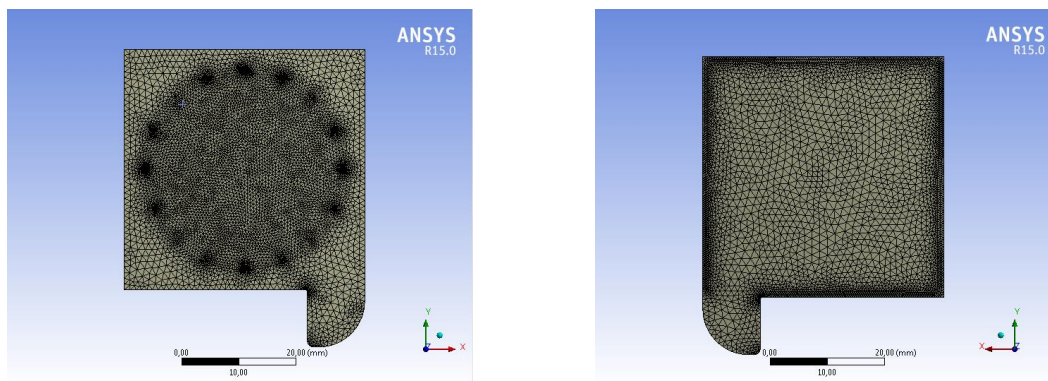
**Figura 6. 39** Distanziatori vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)



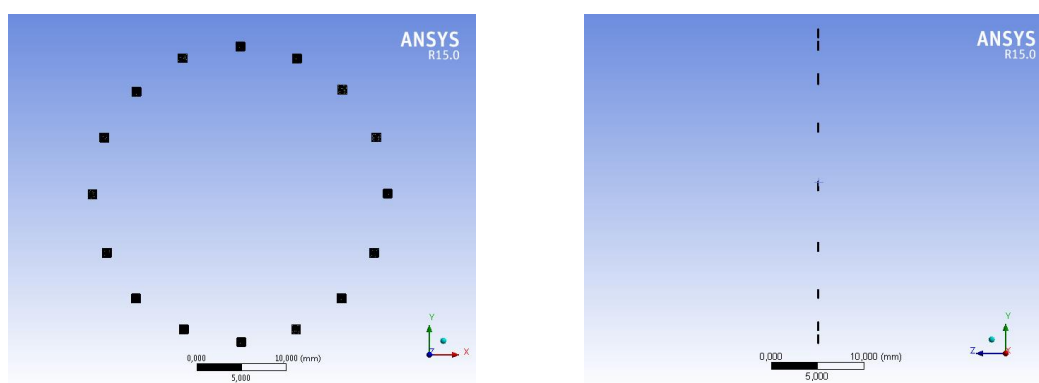
**Figura 6. 40** Assorbitore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)

Le immagini relative alla mesh sono riportate in Figura 6. 40, Figura 6. 41 e Figura 6. 42.

I fenomeni da considerare nell'analisi dipendenti dal flusso elettronico sono i medesimi presenti nel caso del distanziatore ad anello di spessore  $10\mu\text{m}$ . Le formule e le tabelle *Excel* utilizzate per il calcolo dei flussi restano invariate rispetto a tale caso. La tecnica di realizzazione delle colonnine è la medesima descritta nel paragrafo precedente.



**Figura 6. 41** Collettore meshato vista frontale (sinistra) e vista posteriore (destra)



**Figura 6. 42** Distanziatori meshati vista frontale (sinistra) e vista laterale (destra)

## Capitolo 7: Discussione dei risultati

Nel seguente capitolo si andrà ad analizzare i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte con Steady State e con Fluent. In particolare si riporteranno le immagini dei *contours plot* di temperatura dei componenti del dispositivo, grafici con l'andamento delle temperature, della densità di corrente e potenza al variare del flusso entrante.

### 7.1 Anello da 100 $\mu\text{m}$

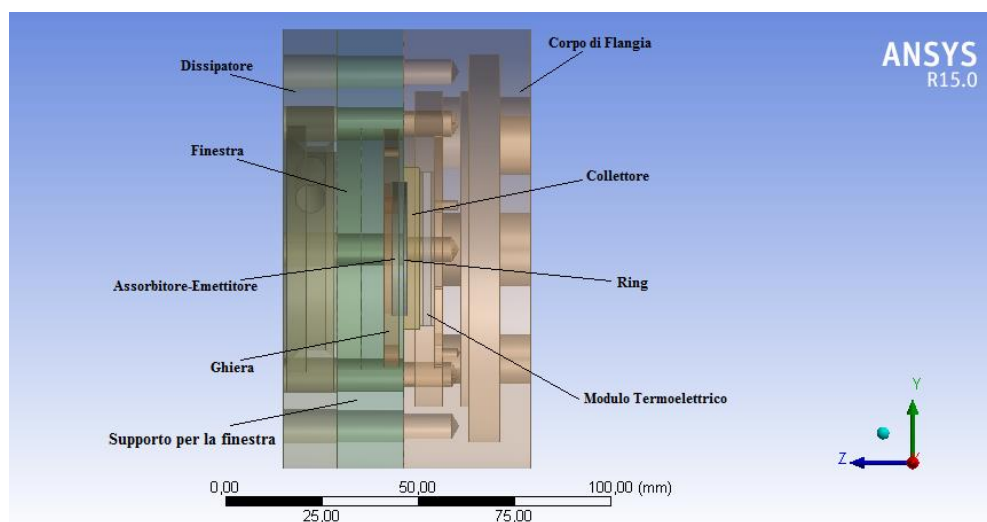
Di seguito si riportano le immagini relative alle distribuzioni di temperatura ottenute con il programma Steady State e con Fluent e i flussi termici ricavati dall'analisi su Fluent per differenti fattori di concentrazione, 300, 400, 500, 600 e 700 soli.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 300 soli.

In Figura 7. 1 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione del dispositivo di conversione. I valori di temperatura sono riportati in °C. Per comprendere meglio Figura 7. 2 in Figura 7. 1 si sono indicati i componenti del dispositivo. La temperatura massima viene raggiunta nel componente assorbitore-emettitore ed è pari a 656,57 °C e va diminuendo spostandosi verso la zona di contatto con la ghiera di sostegno e con l'anello distanziatore.

In questa immagine a causa dell'ampio range di temperatura non è apprezzabile la distribuzione di temperatura nel collettore e nel modulo termoelettrico, benché si possa già notare una zona di riscaldamento nel collettore all'interfaccia con il distanziatore.

Come si può notare in Figura 7. 3 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera ( Figura 7. 3) e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello (Figura 7. 4).



**Figura 7. 1** Sezione del dispositivo

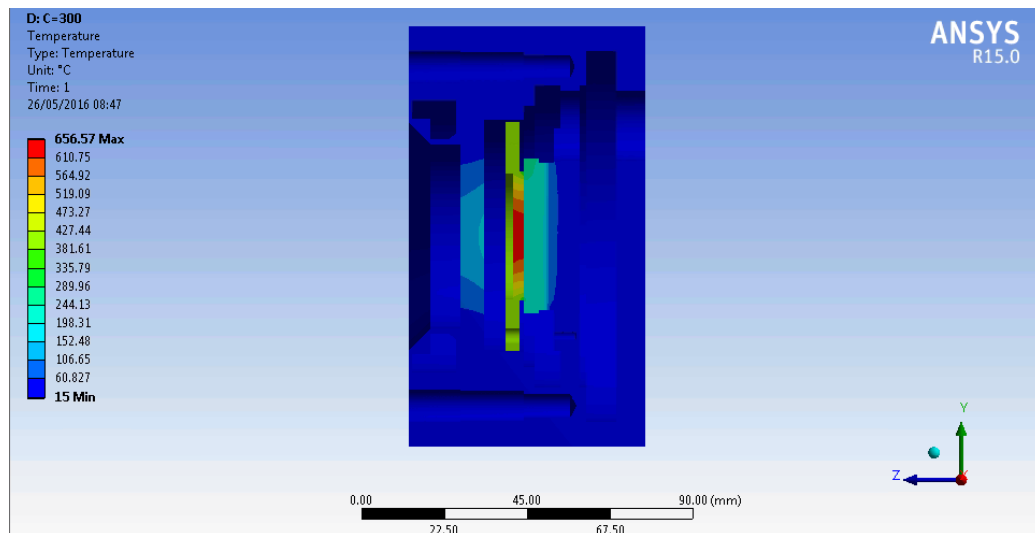
Nel collettore (Figura 7. 5) si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Tale componente è costituito da molibdeno, materiale caratterizzato da una emissività molto bassa,  $\varepsilon = 0.07$ , quindi i flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore.



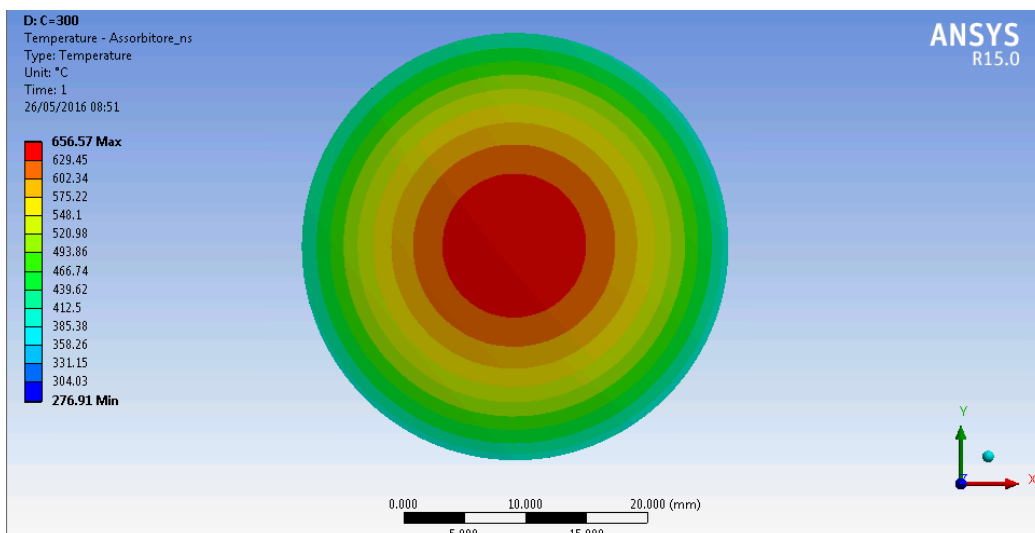
La zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore è dovuta al contatto di tale parte con la flangia di supporto per la finestra. La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 246 °C.

Il modulo termoelettrico (Figura 7. 6) si interfaccia da un lato con il collettore, definito lato caldo, e dall'altra con il corpo di flangia, definito lato freddo.

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 240 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sulla lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 70°C.

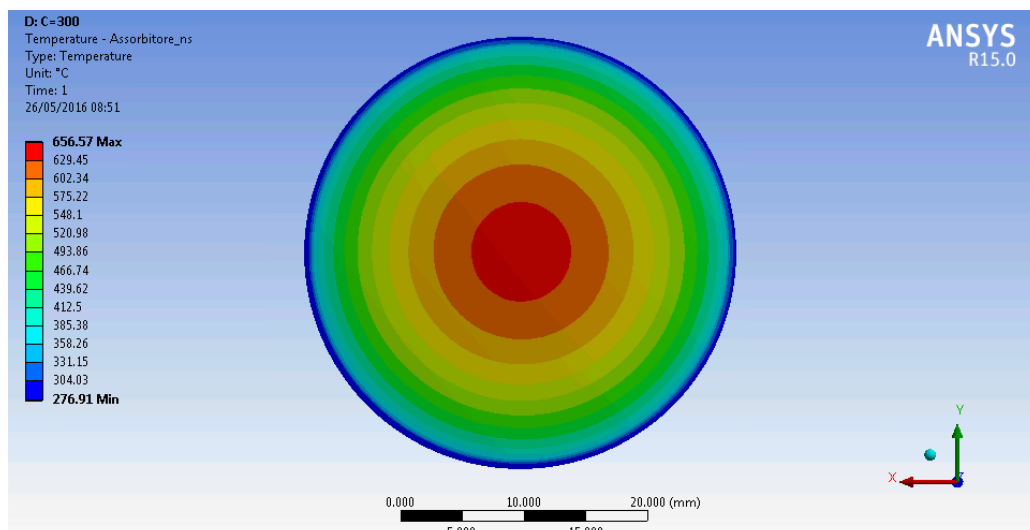


**Figura 7. 2** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli

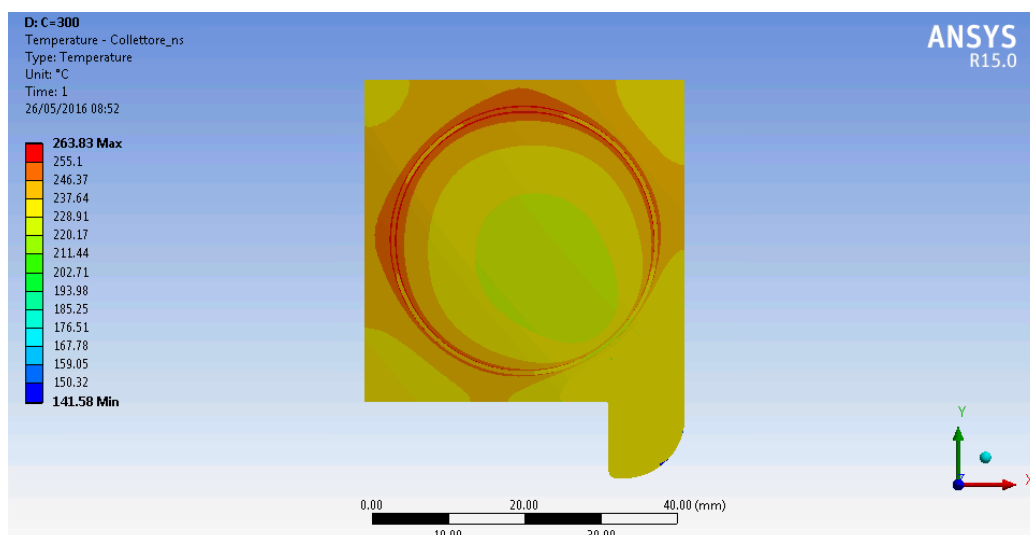


**Figura 7. 3** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli

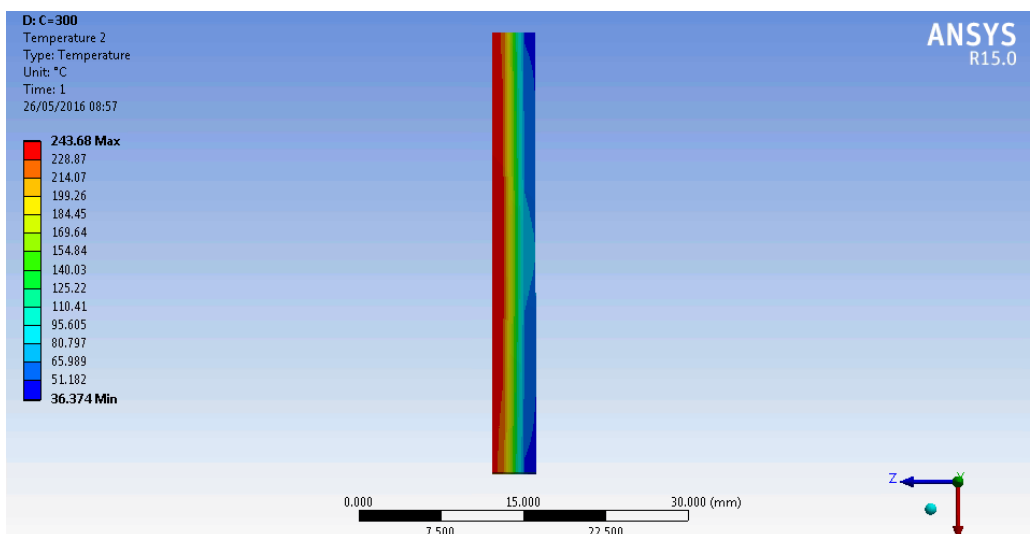
La finestra (Figura 7. 7 e Figura 7. 8) raggiunge la massima temperatura, pari a 164,87 °C, sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. La presenza del dissipatore, sulla cui parete interna è stata imposta una temperatura di 15 °C, mantiene la finestra ad una temperatura di 20 °C nella zona di contatto. Sul lato di interfaccia con l'esterno, la temperatura massima raggiunta è circa pari a 135 °C, inferiore di quella raggiunta sull'altro lato. Ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo che compone la finestra.



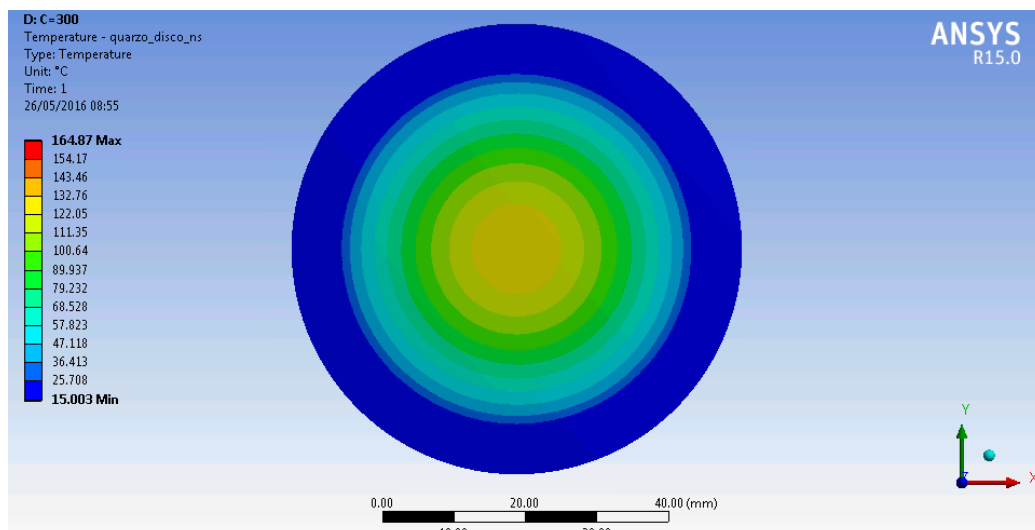
**Figura 7. 4** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli



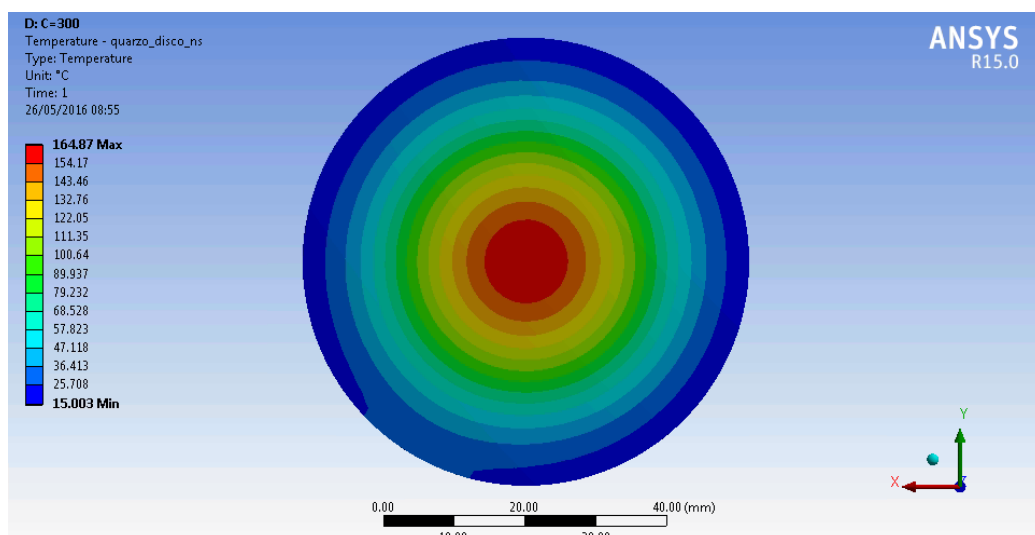
**Figura 7. 5** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli



**Figura 7. 6** Distribuzione della temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli

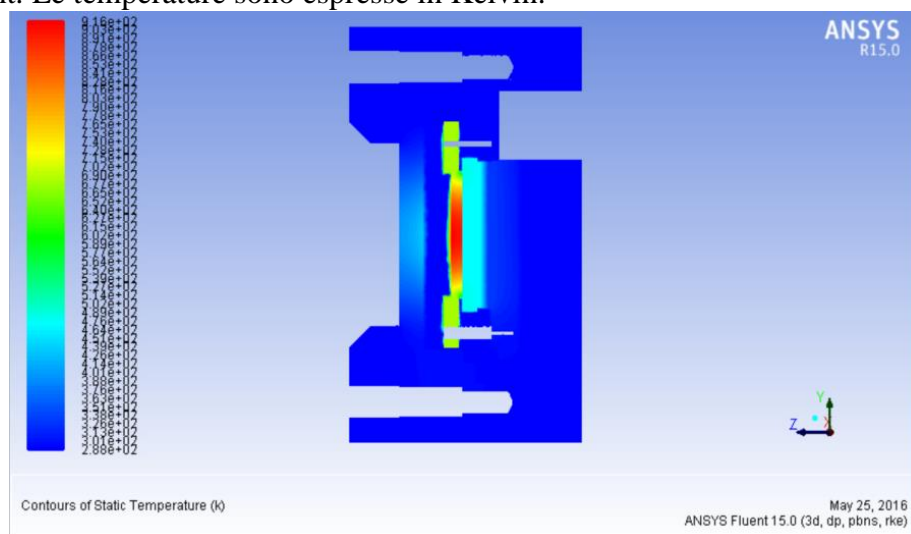


**Figura 7. 7** Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli

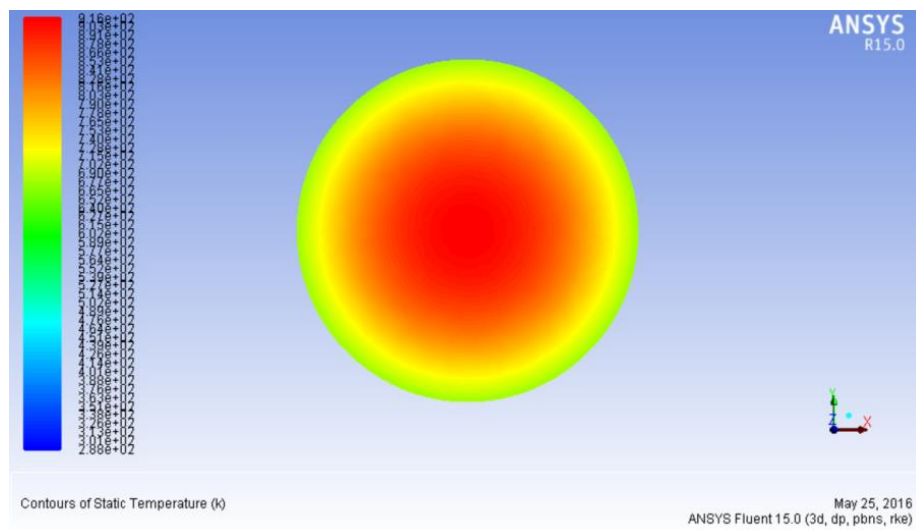


**Figura 7. 8** Distribuzione della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli

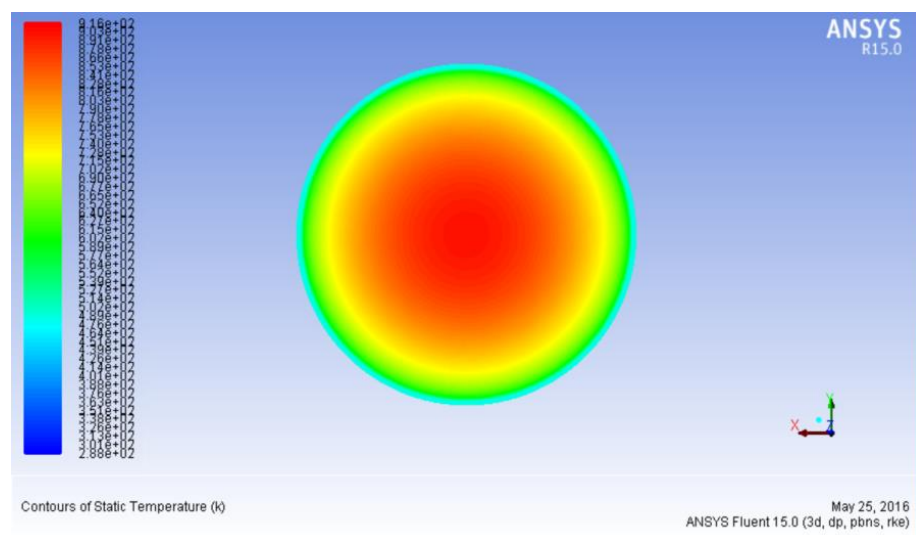
Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono espresse in Kelvin.



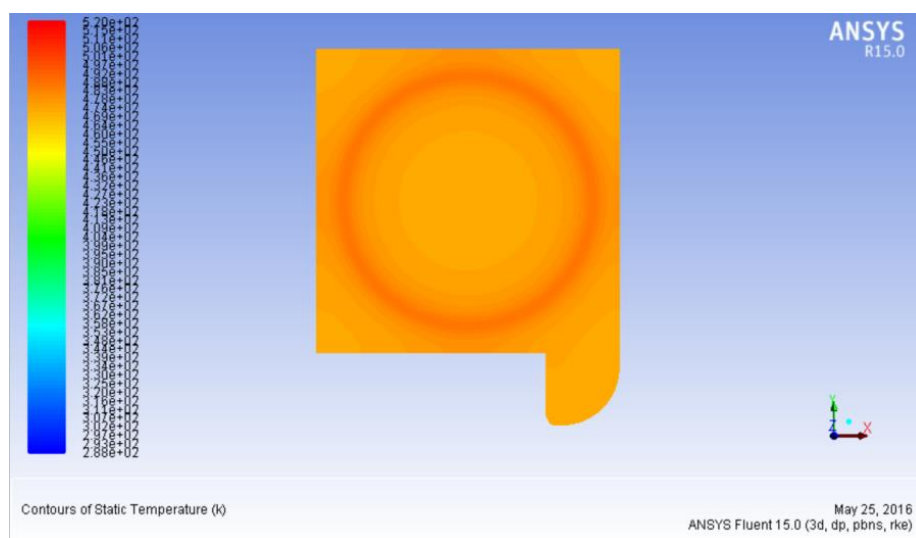
**Figura 7. 9** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=300 soli



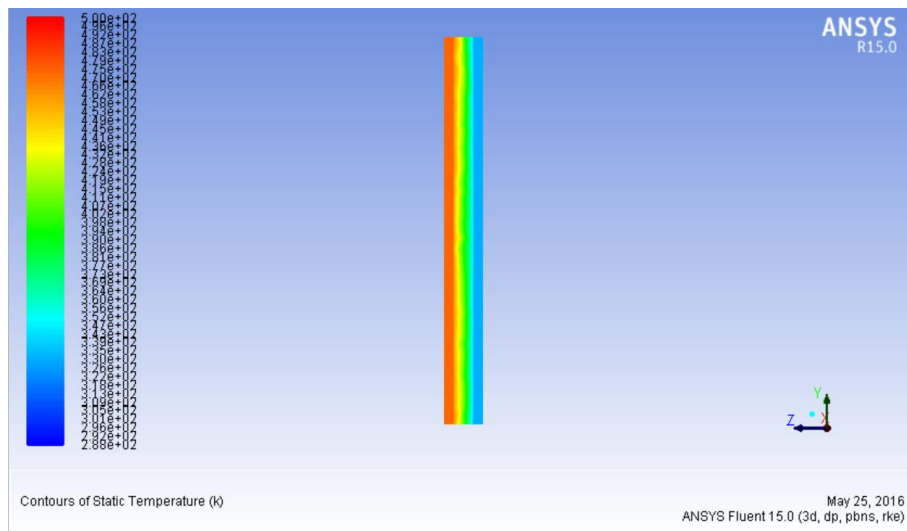
**Figura 7. 10** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=300$  soli



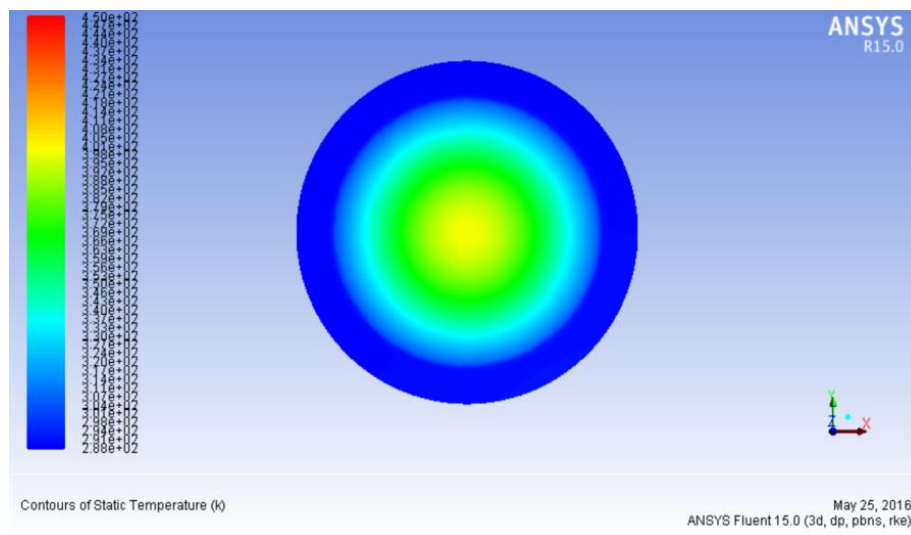
**Figura 7. 11** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=300$  soli



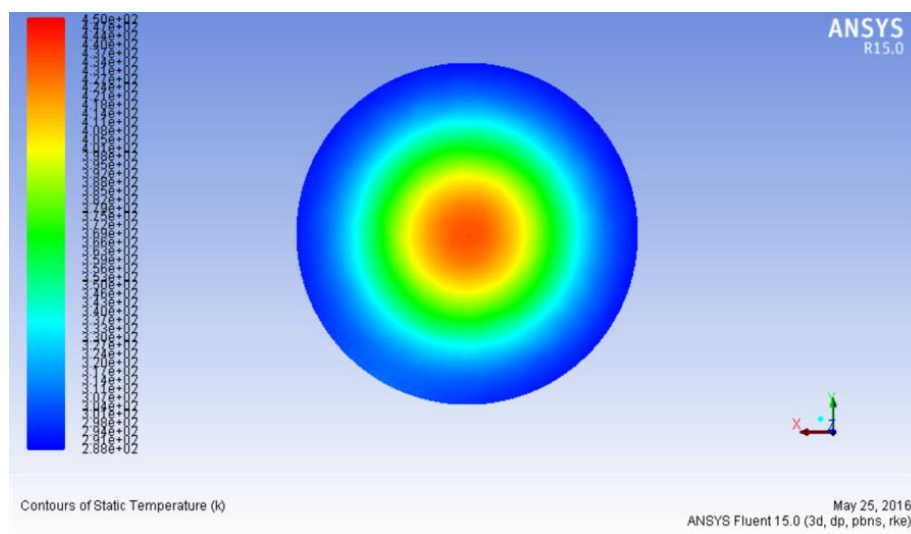
**Figura 7. 12** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=300$  soli



**Figura 7. 13** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli



**Figura 7. 14** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli



**Figura 7. 15** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli

Come si è spiegato nel capitolo precedente, a causa della presenza di un gap interelettrodico troppo ampio, gli effetti di carica spaziale negativa causata da elettroni emessi termoionicamente, inibiscono l'instaurarsi di flussi elettronici significanti. Quindi ai fini dell'analisi termica il modulo termoionico si comporta come un dissipatore, ed è stata considerata solo la produzione di potenza dal modulo termoelettrico.

In Figura 7. 9 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State. Ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore (Figura 7. 10 e Figura 7. 11) segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 642,86 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 240,65 °C.

Il collettore, Figura 7. 12, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 235 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State. Ciò è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui si è imposta una temperatura di parete fissa. Anche in questo caso si ritrova una temperatura più bassa nell'orecchio del collettore, dovuta al contatto con il corpo di flangia. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 215 °C.

Nella Figura 7. 13 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 205 °C mentre il lato freddo a 59,28 °C. Le temperature registrate sono inferiori rispetto al caso simulato in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 14 e Figura 7. 15, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 159 °C contro i 165 °C della simulazione con Steady State. Ciò è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

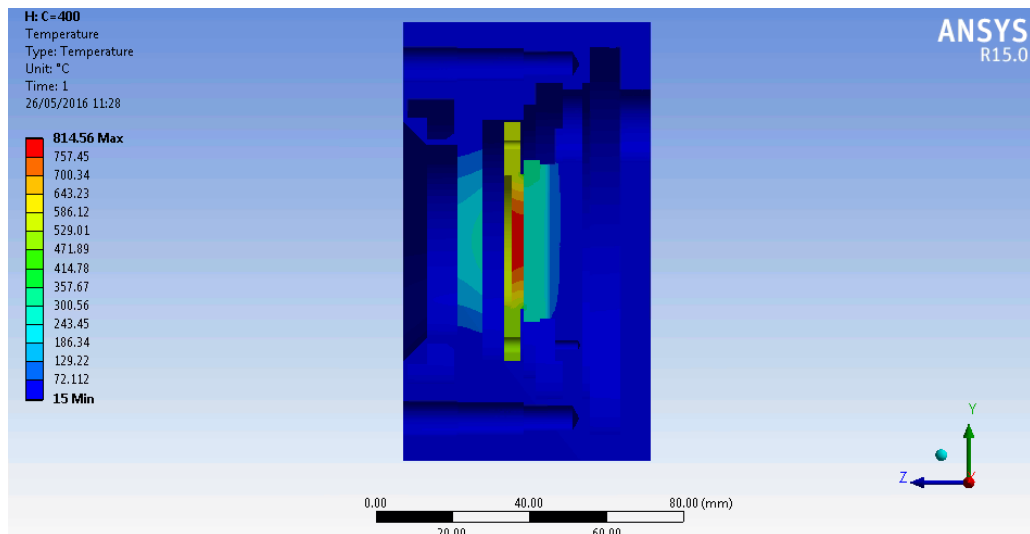
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 245 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 12,13 W, di cui 1,1 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 10,6 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 232,87 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 164,09 W di cui 163 W sono scambiati per conduzione e 1,09 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 28,8 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,1 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 135,15 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

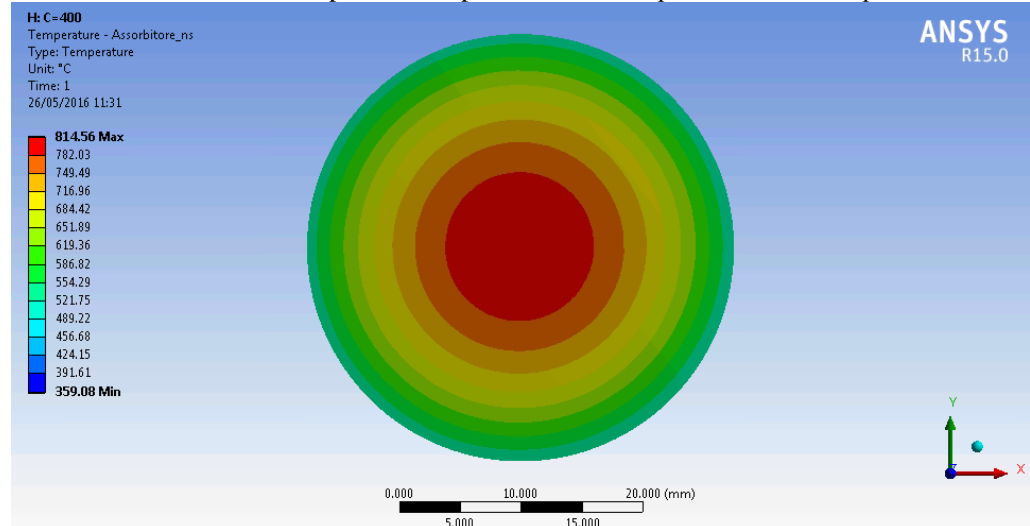
La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 135,15 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 6,7 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,2 W. La restante potenza, 128,27 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 11,4 W, di cui 6,3 W vengono scambiati con il dissipatore, 2,25 W per conduzione con la flangia e 2,8 W per convezione con l'esterno.

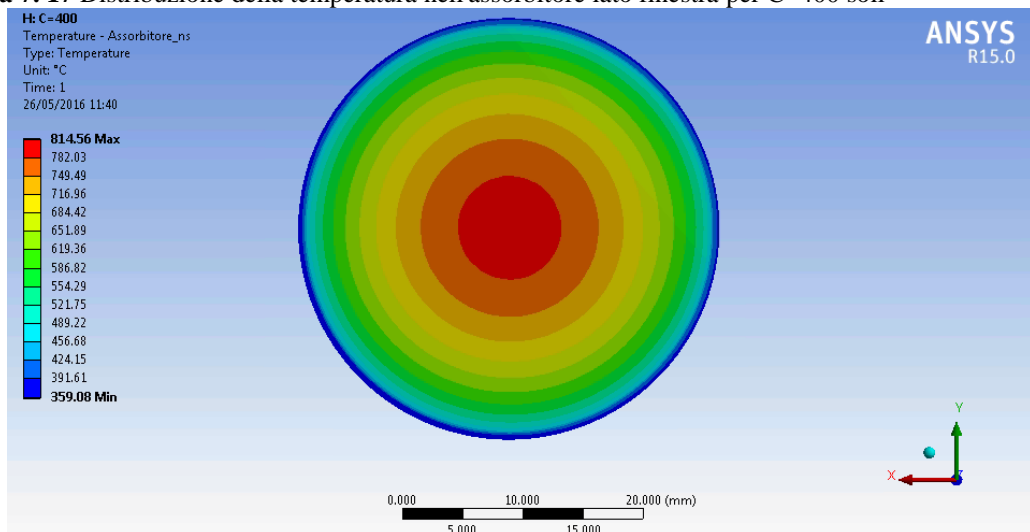
Si affronta ora il caso con fattore di concentrazione pari a 400 soli.



**Figura 7. 16** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli



**Figura 7. 17** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli



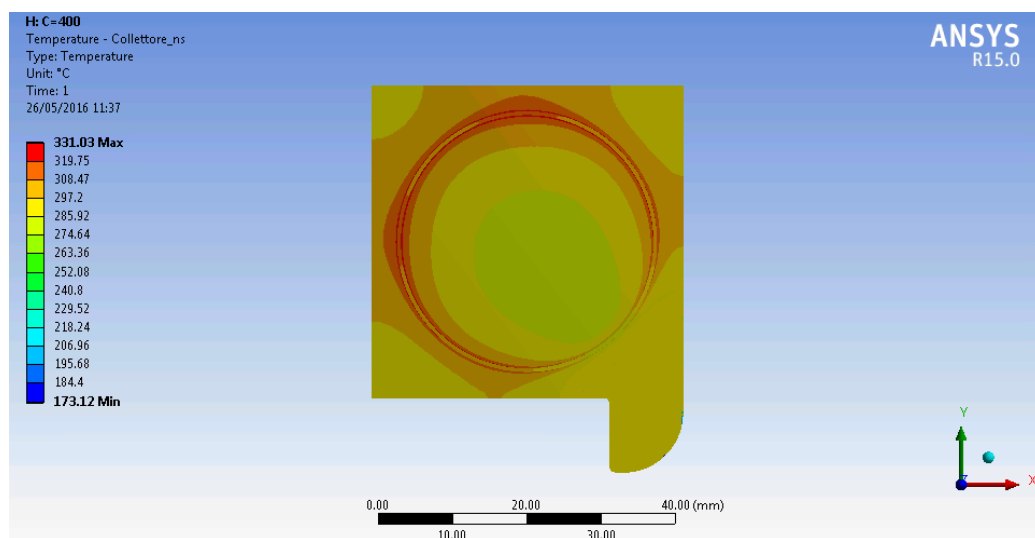
**Figura 7. 18** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli

Le osservazioni fatte per il caso caratterizzato da un fattore di concentrazione pari a 300 soli valgono anche per questo caso in quanto i meccanismi di scambio sono i medesimi.

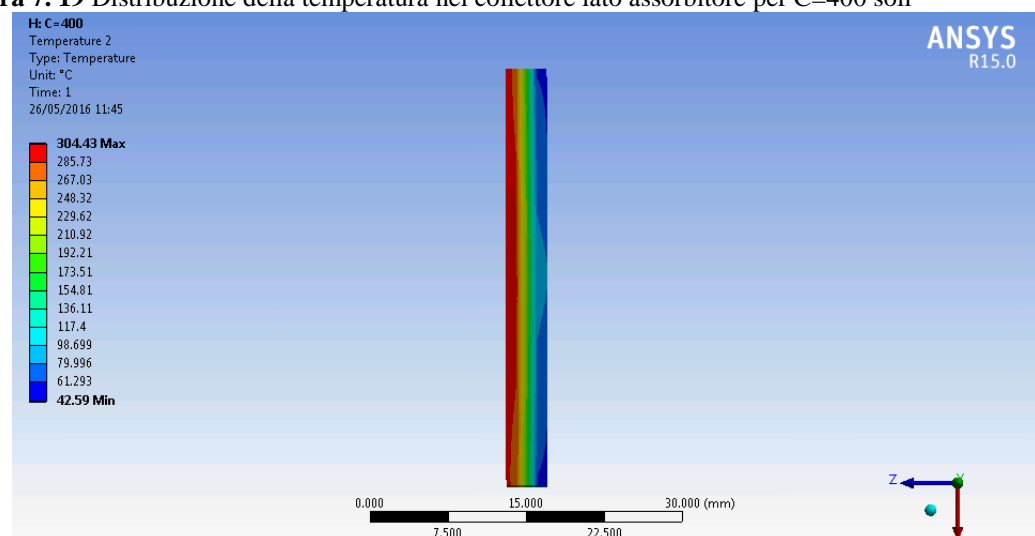
In Figura 7. 19 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento alla Figura 7. 1 dove sono indicati i componenti del dispositivo.

La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 814,56 °C. Come si può notare in Figura 7. 17 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. La temperatura va diminuendo verso la zona periferica dove l'assorbitore si interfaccia con la ghiera di sostegno e l'anello distanziatore.

Nel collettore, Figura 7. 19, si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Come nel caso precedente i flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. La zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore è dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra. Sul lato posteriore la distribuzione si discosta leggermente da quella ottenuta nel caso di C=300 soli, compaiono due zone a temperatura maggiore posizionate nella parte del collettore opposta all'orecchia, ma complessivamente la temperatura si mantiene omogenea e pari a 297°C.



**Figura 7. 19** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli



**Figura 7. 20** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 291 °C. Il lato freddo invece si porta ad

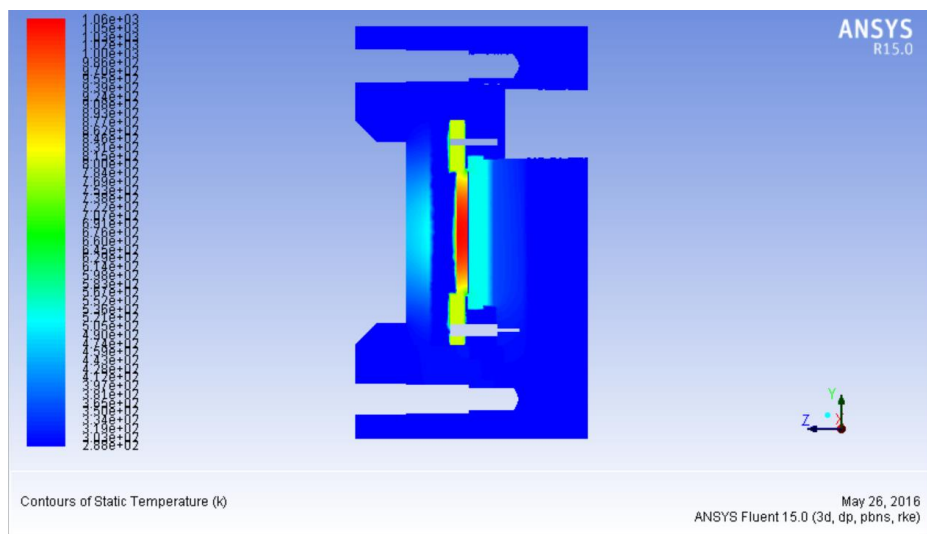


una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 85°C.

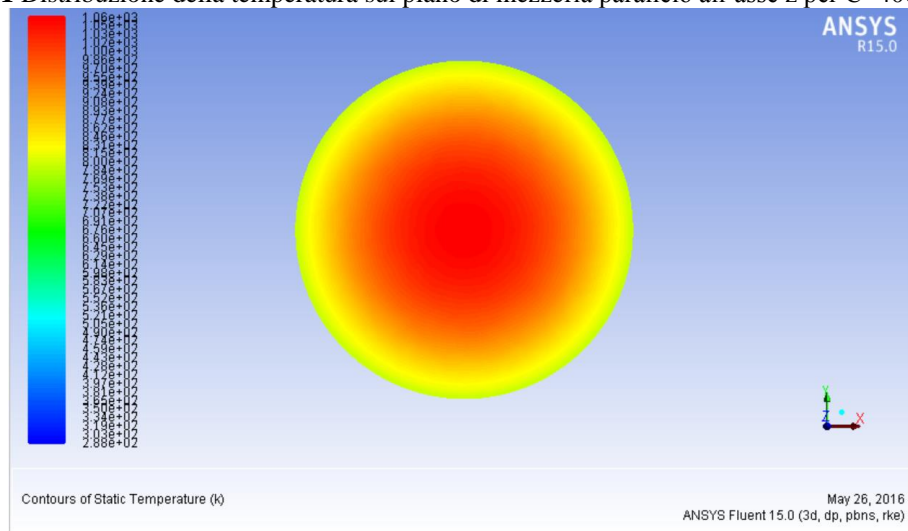
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 7e Figura 7. 8, ma in un range di temperatura compreso tra 278,28 °C e 15 °C.

La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 220 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito si riportano le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent.



**Figura 7. 21** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli

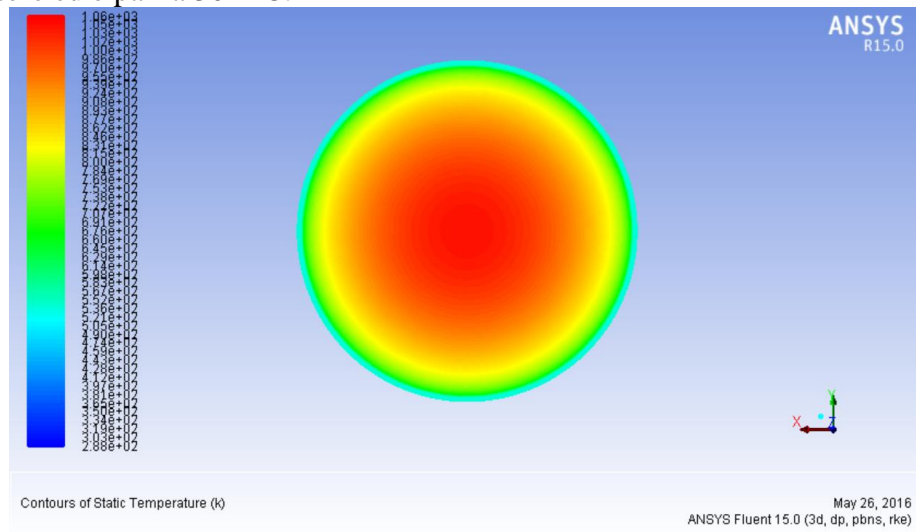


**Figura 7. 22** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli

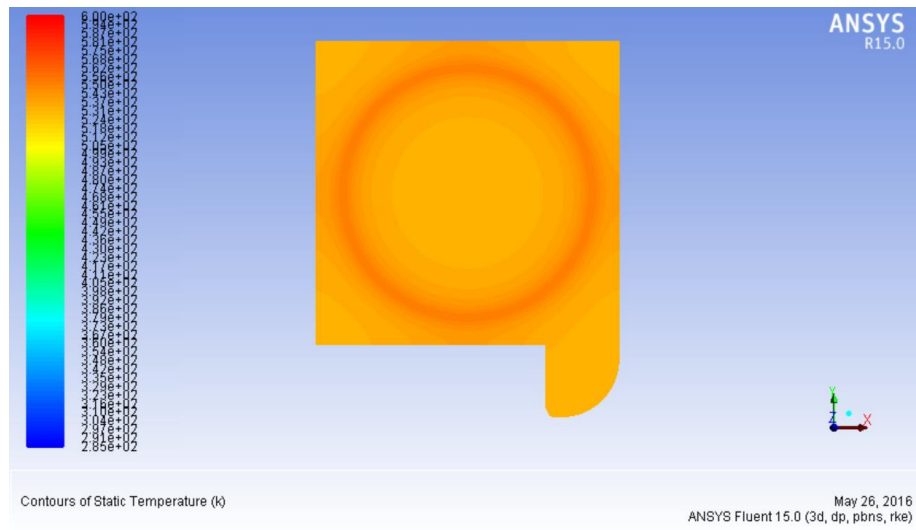
In Figura 7. 21 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 22 e Figura 7. 23, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 790,13 °C, è leggermente

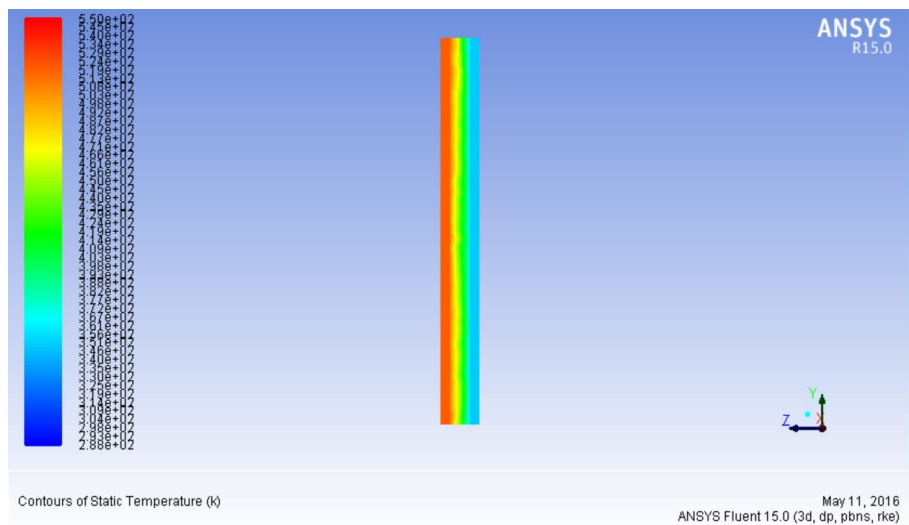
inferiore. La temperatura minima è raggiunta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 301 °C.



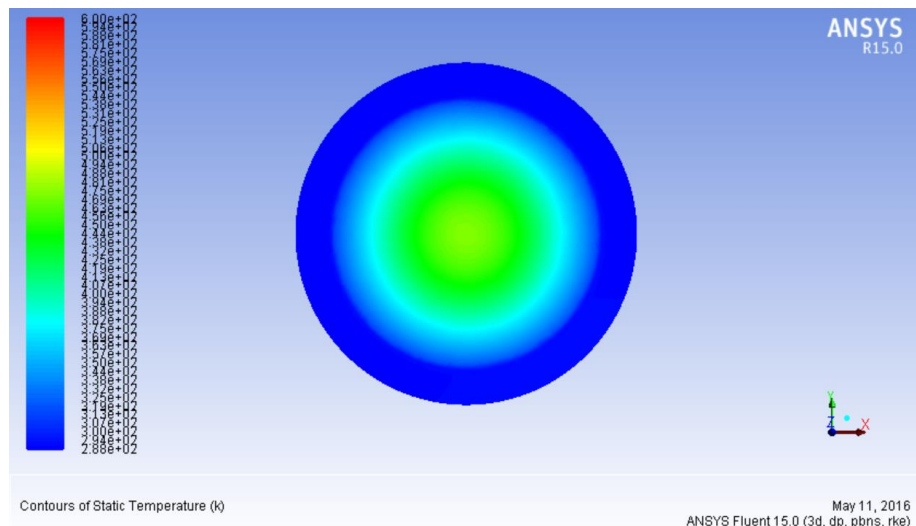
**Figura 7. 23** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli



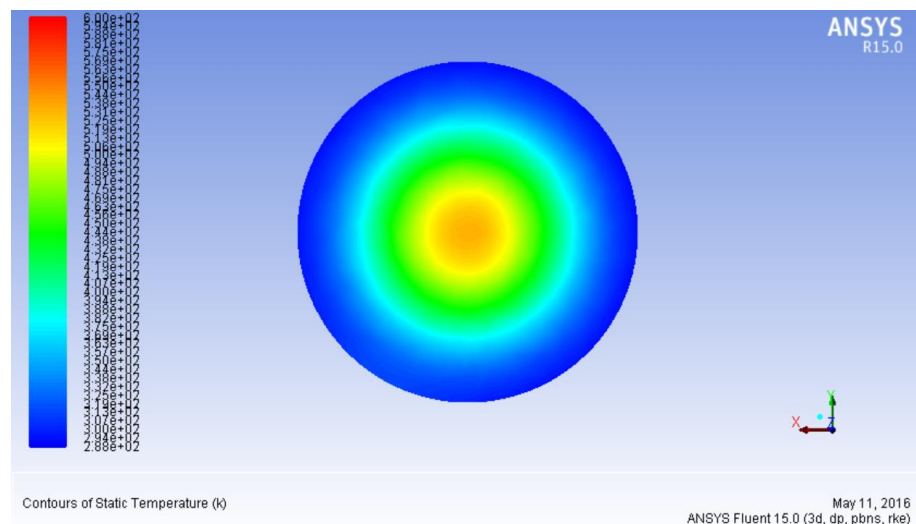
**Figura 7. 24** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli



**Figura 7. 25** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli



**Figura 7. 26** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli



**Figura 7. 27** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli

Il collettore (Figura 7. 24) presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 279 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso analizzato con Steady State. Anche in questo caso si ritrovano una temperatura più bassa nell'orecchio dovuto al contatto con il corpo di flangia. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico (Figura 7. 25), la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 252 °C.

Nelle Figura 7. 26 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 240 °C mentre il lato freddo 74,2 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto a quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra (Figura 7. 27) rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è di molto inferiore: è pari a circa 247 °C contro i 278 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

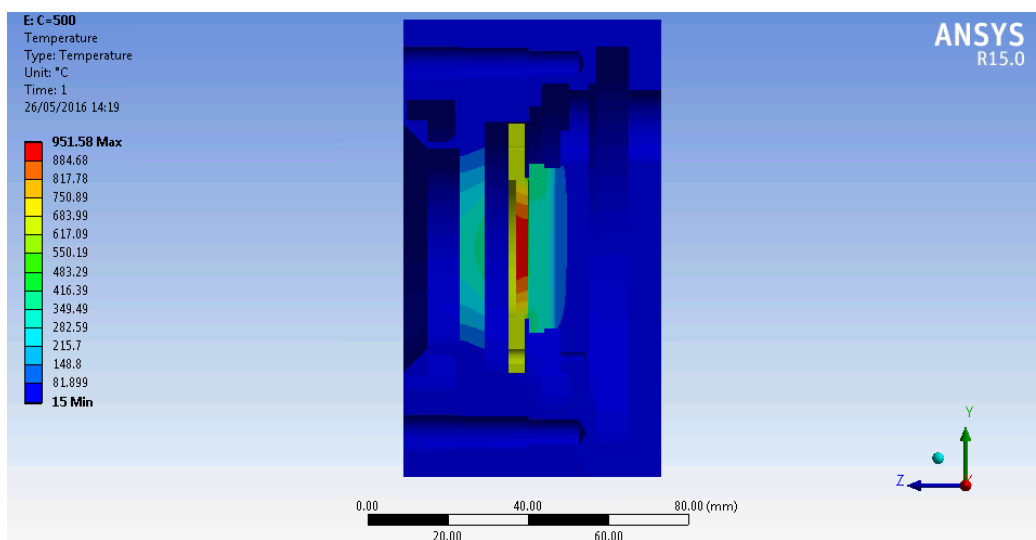
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 326 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 21 W, di cui 2 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e, della restante potenza, circa 18,7 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 302,32 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 200,17 W di cui 193,2 W sono scambiati per conduzione e 1,97 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 32 W scambiati per conduzione con la flangia della finestra, 0,18 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 170 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 170 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 8,5 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,3 W e la restante potenza (161,2 W) è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 20,15 W, di cui 10,7 W vengono scambiati con il dissipatore, 4,23 W per conduzione con la flangia e 5,2 per convezione con l'esterno.

Si affronta ora il caso con fattore di concentrazione pari a 500 soli.



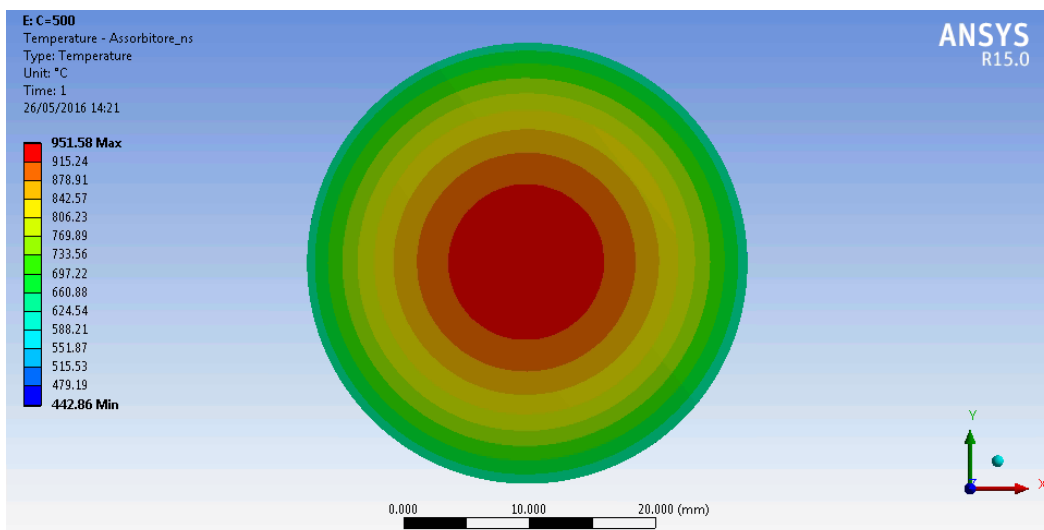
**Figura 7. 28** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli

In Figura 7. 28 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione del dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento alla Figura 7. 1 dove sono indicati i componenti del dispositivo.

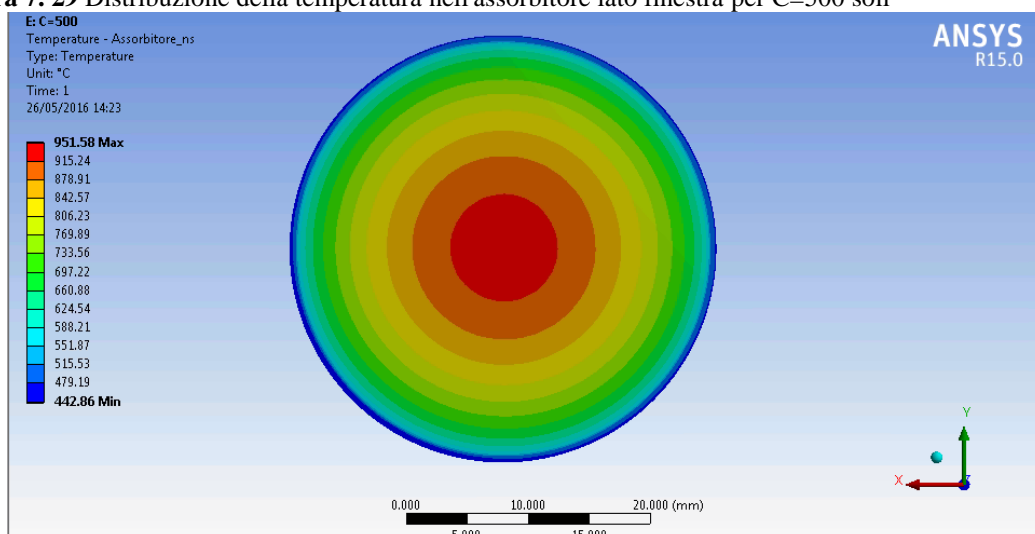
La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 951,58 °C. La finestra viene riscaldata per irraggiamento dall'assorbitore e dalla ghiera. Il collettore si scalda per scambio conduttivo con il distanziatore e per scambio radiativo con l'assorbitore.

Come si può notare in Figura 7. 29 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante.

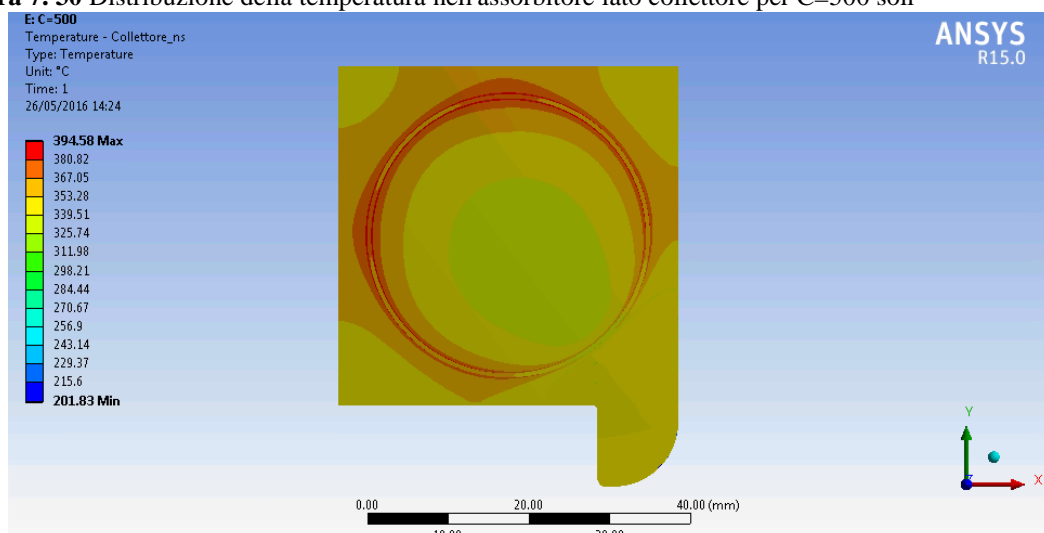
La temperatura va diminuendo verso la zona periferica dove l'assorbitore si interfaccia con la ghiera di sostegno e l'anello distanziatore, Figura 7. 29 e Figura 7. 30.



**Figura 7. 29** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli

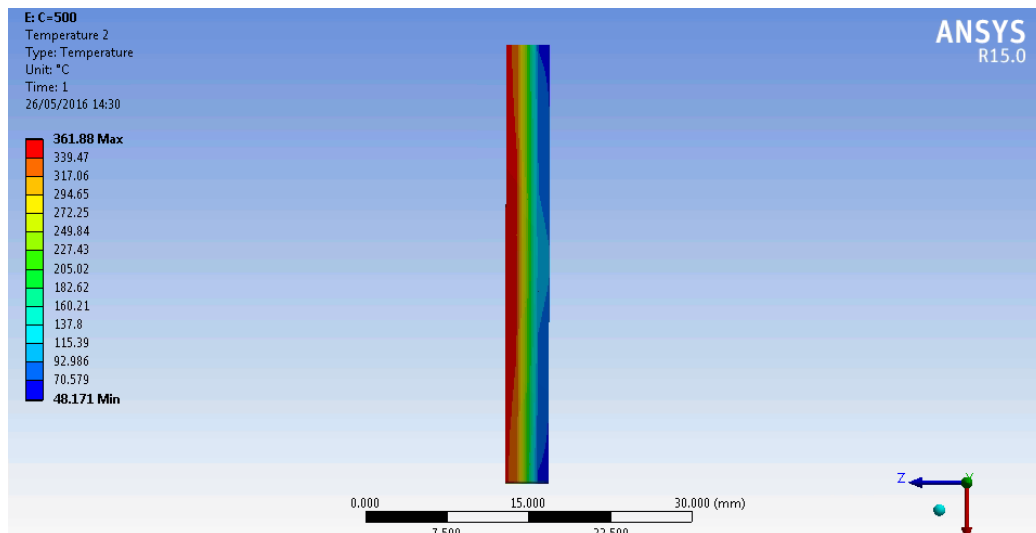


**Figura 7. 30** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli



**Figura 7. 31** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli

Sul lato posteriore la distribuzione si discosta leggermente da quella ottenuta nel caso di C=400 soli, la temperatura si mantiene circa omogenea e pari a 360 °C, ma è presente una zona a temperatura maggiore posizionata nella parte del collettore opposta all'orecchio.



**Figura 7. 32** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea pari a 341 °C sulla superficie di interfaccia con il collettore. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 110 °C. La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli (Figura 7. 7 e Figura 7. 8), ma in un range di temperatura compreso tra 397,78 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è di circa 300 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto. Ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione sia alla bassa conducibilità termica del quarzo.

Di seguito si riportano le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent.

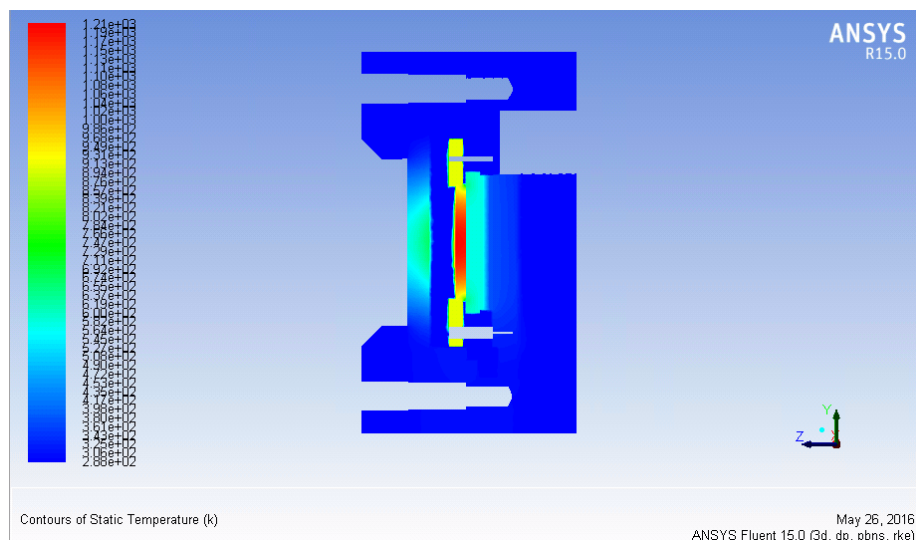
In Figura 7. 33 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 34 e Figura 7. 35 segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 932,8 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è raggiunta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 372 °C (Figura 7. 35).

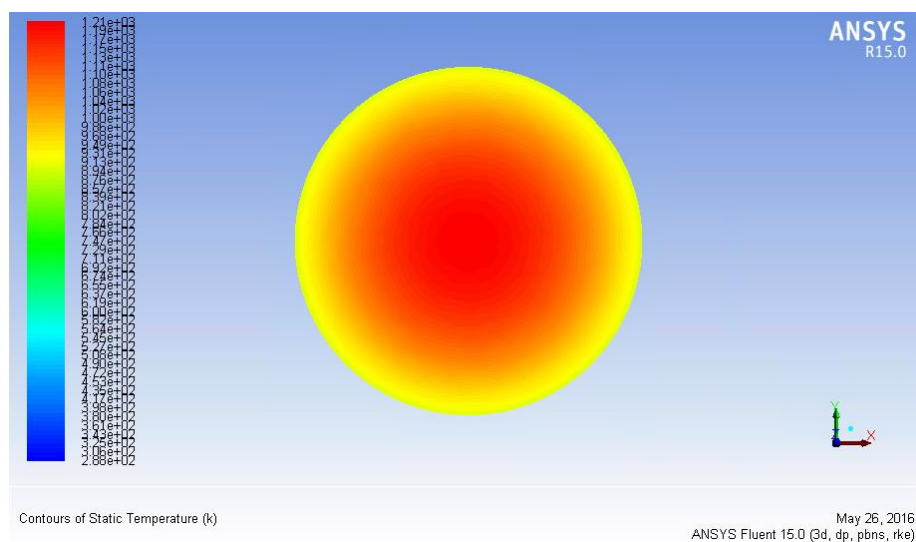
Il collettore (Figura 7. 36) presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 350 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State. Anche in questo caso si ritrovano una temperatura più bassa nell'orecchio dovuta al contatto con il corpo di flangia. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 383°C,.

In Figura 7. 37 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 296 °C mentre il lato freddo 80,15 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

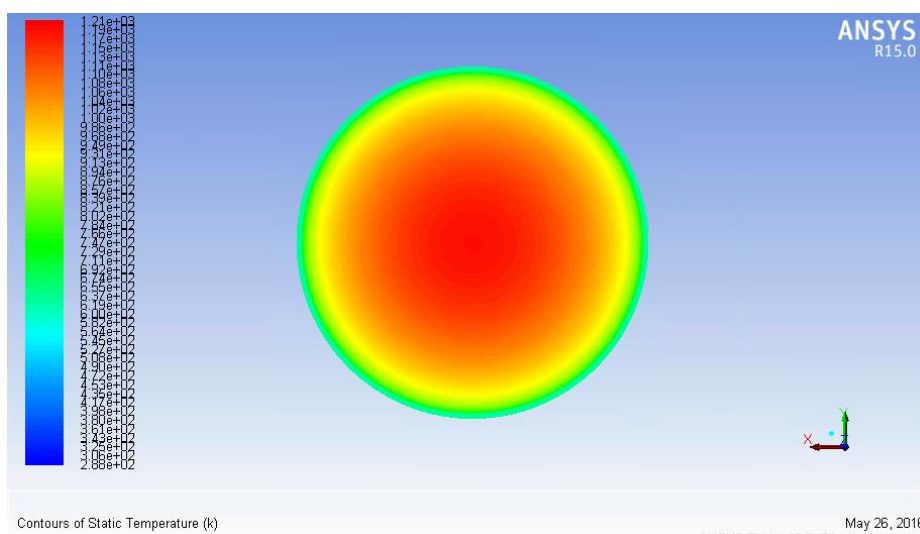




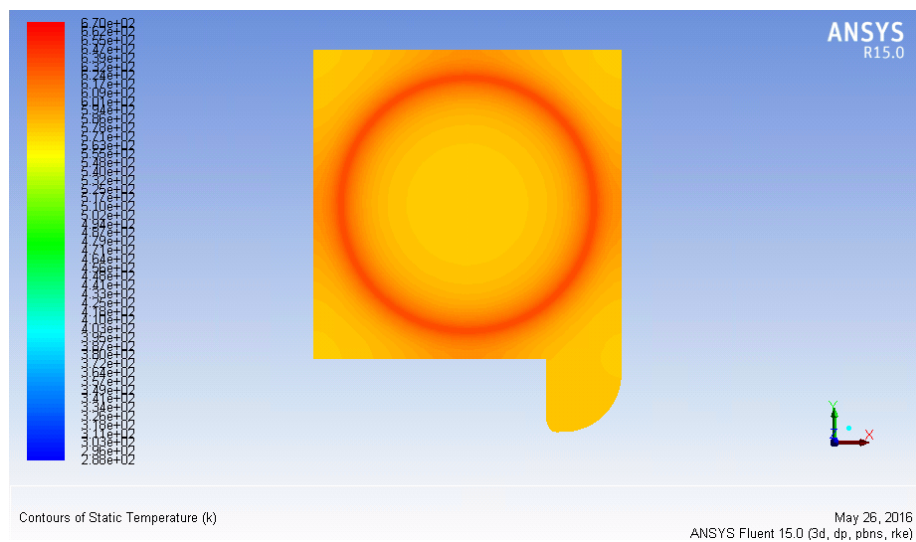
**Figura 7. 33** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per  $C=500$  soli



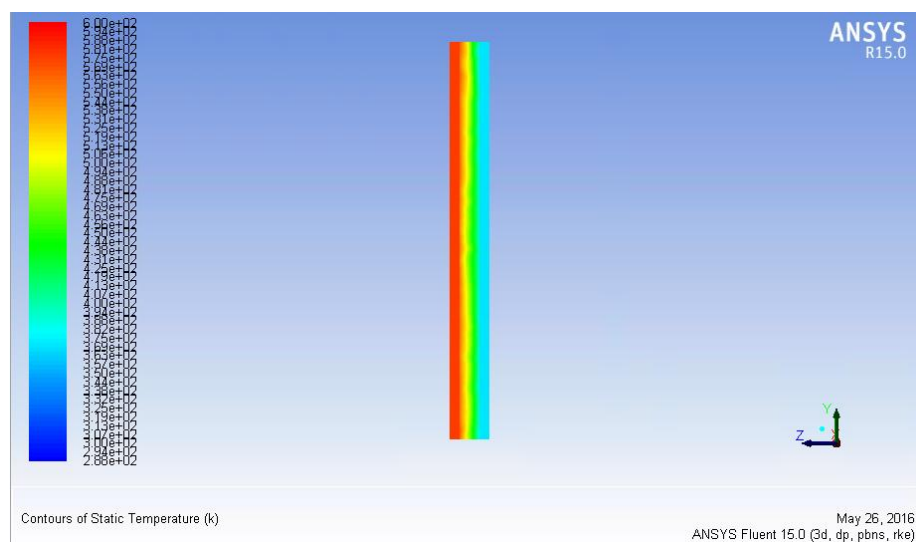
**Figura 7. 34** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=500$  soli



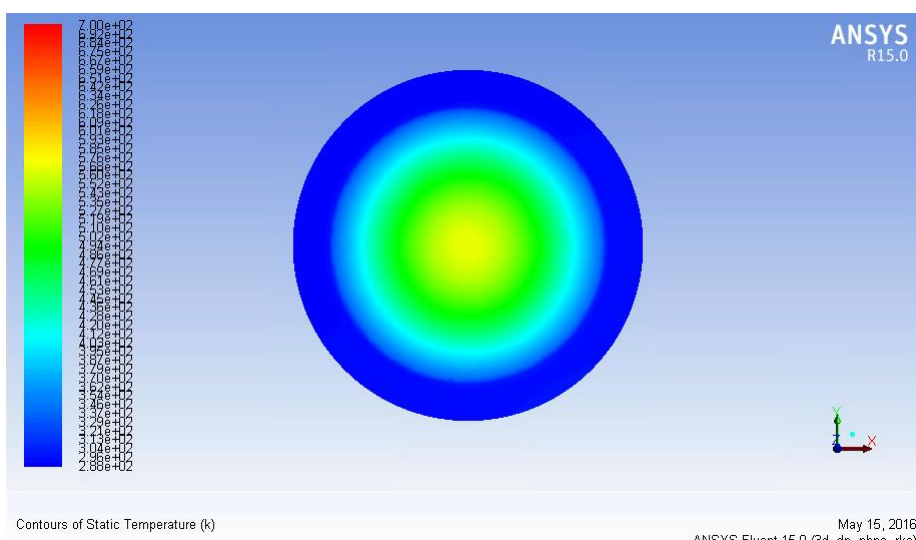
**Figura 7. 35** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=500$  soli



**Figura 7. 36** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=500$  soli

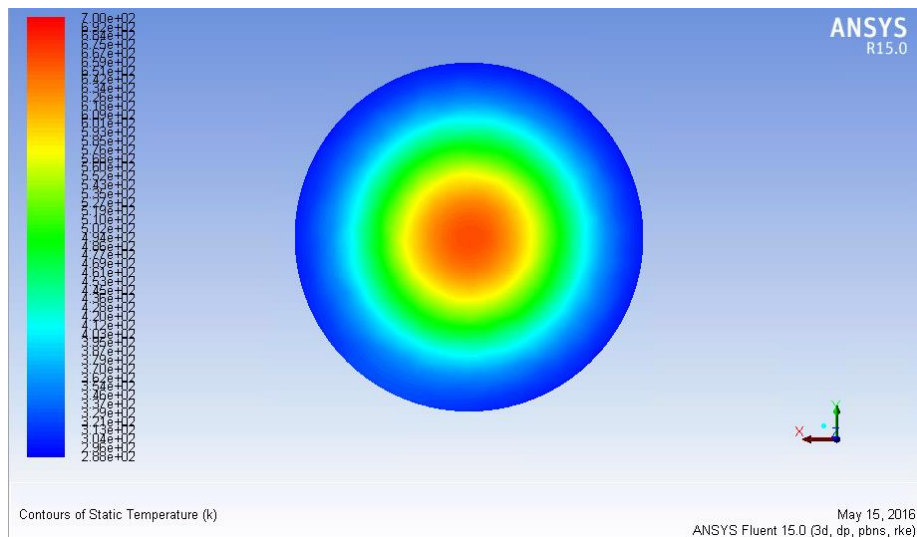


**Figura 7. 37** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=500$  soli



**Figura 7. 38** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per  $C=500$  soli





**Figura 7. 39** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli

La temperatura nella finestra, Figura 7. 38 e Figura 7. 39, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è di molto inferiore ed è pari a circa 395 °C contro i 398 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 408 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 37,4 W, di cui 3,6 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 32,6 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 370,6 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 244,5 W di cui 240,9 W sono scambiati per conduzione e 3,6 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 46 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,29 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 198,2 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 198,2 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 9,9 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,42 W e la restante potenza, 187,83 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 34,6 W, di cui 17,5 W vengono scambiati con il dissipatore, 7,36 W per conduzione con la flangia e 9,75 per convezione con l'esterno.

Si affronta ora il caso con fattore di concentrazione pari a 600 soli.

In Figura 7. 40 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento alla Figura 7. 1 dove sono indicati i componenti del dispositivo.

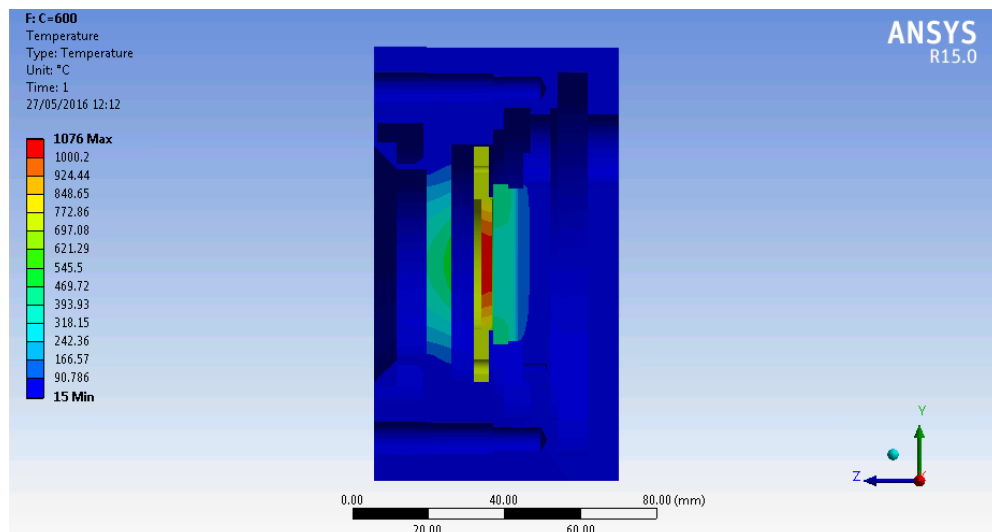
La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1076 °C. La finestra viene riscaldata per irraggiamento dall'assorbitore e dalla ghiera. Il collettore si scalda per scambio conduttivo con il distanziatore e per scambio radiativo con

l'assorbitore. Come si può notare in Figura 7. 41 , la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. La temperatura va diminuendo verso la zona periferica dove l'assorbitore si interfaccia con la ghiera di sostegno e l'anello distanziatore, Figura 7. 41e Figura 7. 42.

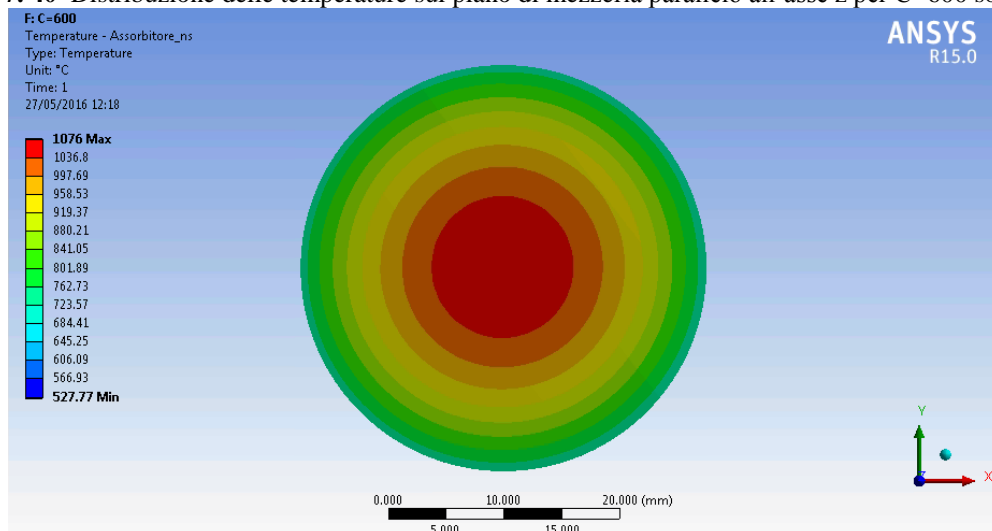
Nel collettore, Figura 7. 43, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Come nel caso precedente lo scambio di calore per conduzione è predominante rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. La zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore è dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .

Sul lato posteriore la distribuzione si discosta leggermente da quella ottenuta nel caso di  $C=500$  soli, la temperatura si mantiene circa omogenea ma compare un' area a temperatura maggiore nella zona più distante dall'orecchia.

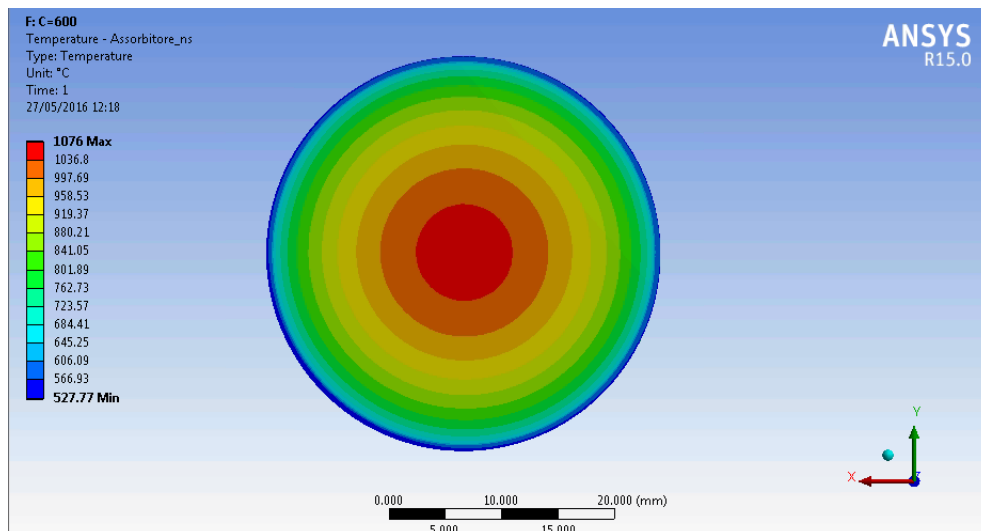
Il lato caldo del modulo termoelettrico, Figura 7. 44, si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a  $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sulla lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a  $123^{\circ}\text{C}$ .



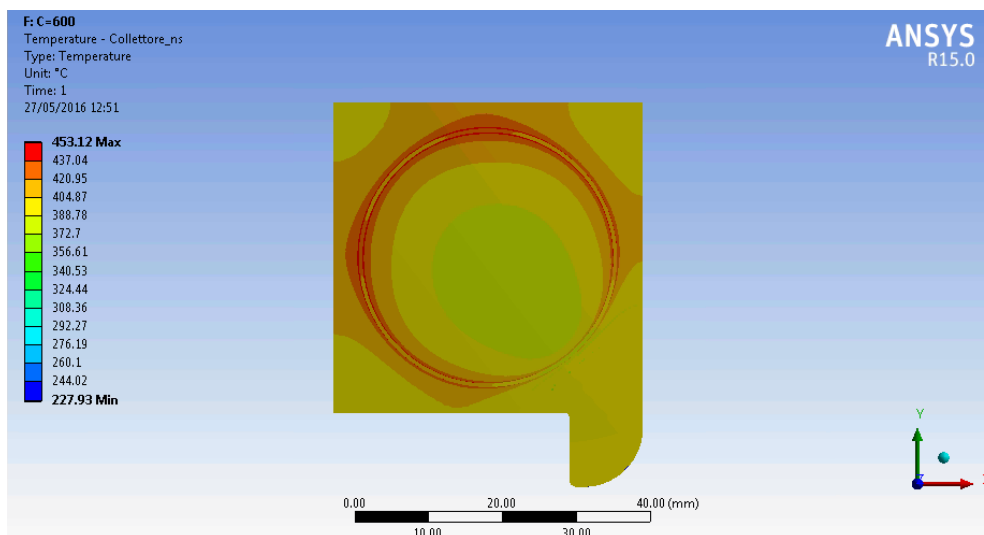
**Figura 7. 40** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per  $C=600$  soli



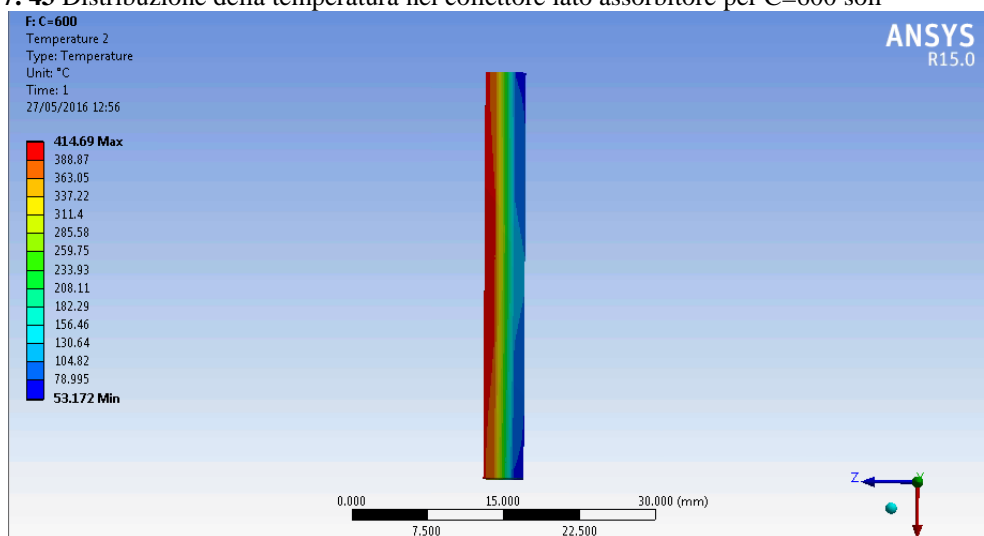
**Figura 7. 41** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per  $C=600$  soli



**Figura 7. 42** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli



**Figura 7. 43** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli



**Figura 7. 44** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli

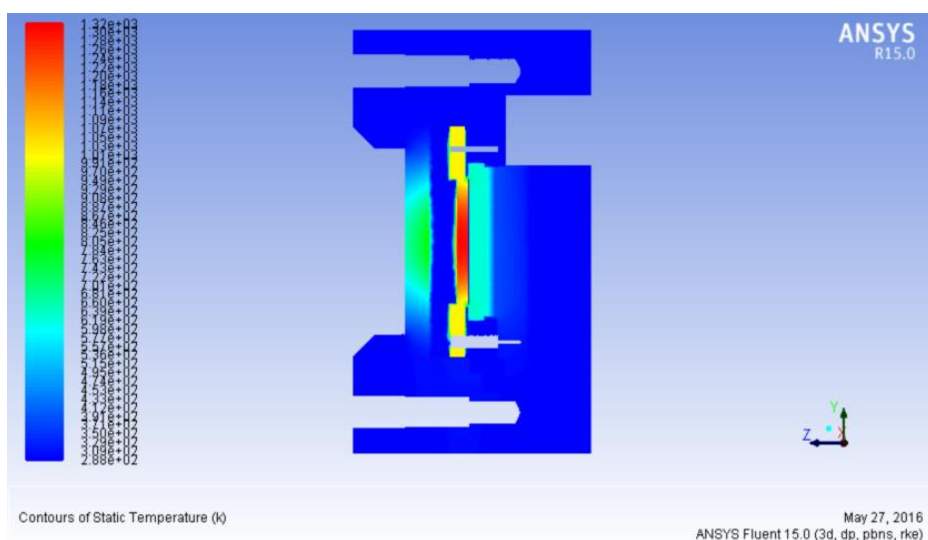
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con  $C=300$  soli, Figura 7. 7e Figura 7. 8, ma in un range di temperatura compreso tra  $521,78\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 413 inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

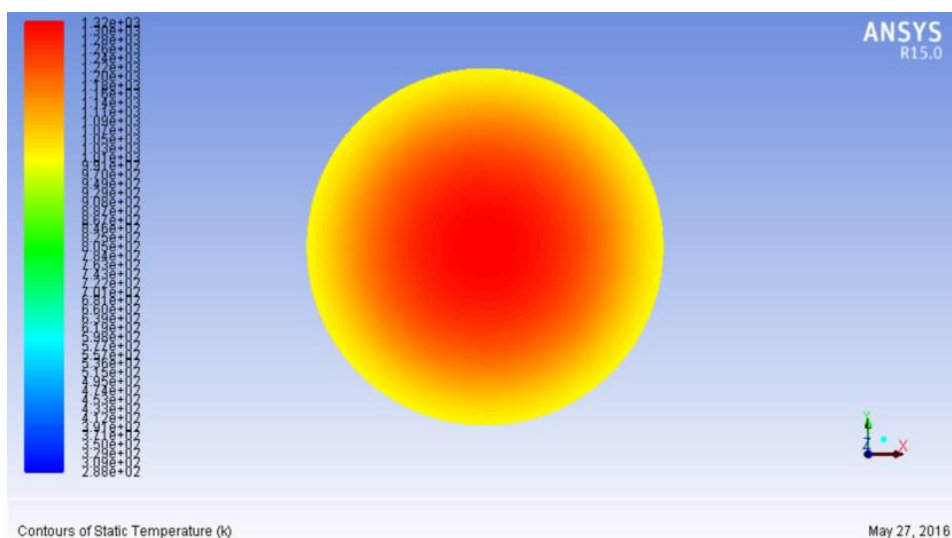
Di seguito si riportano le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent.

In Figura 7. 45 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

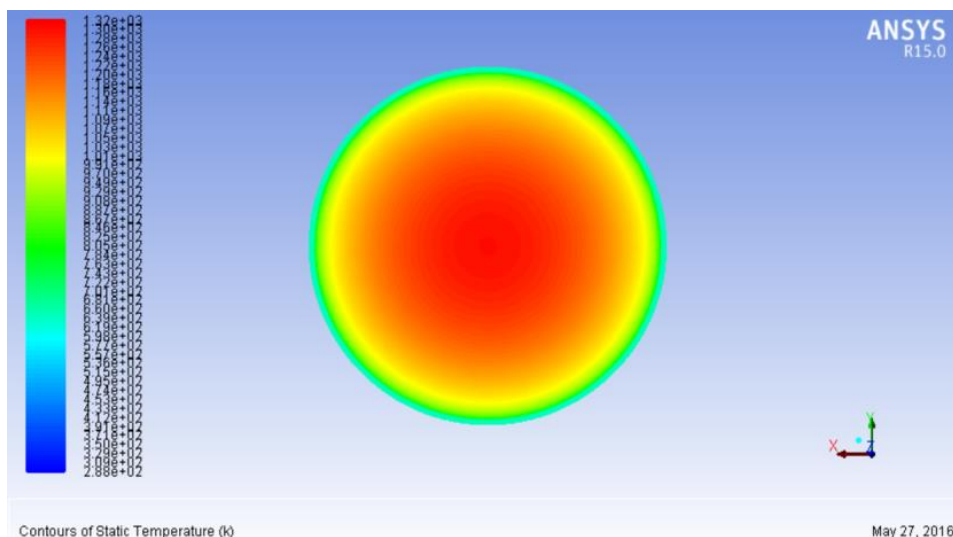
L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 46 e Figura 7. 47, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a  $1047\text{ }^{\circ}\text{C}$ , è leggermente inferiore. La temperatura minima è raggiunta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a  $382\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



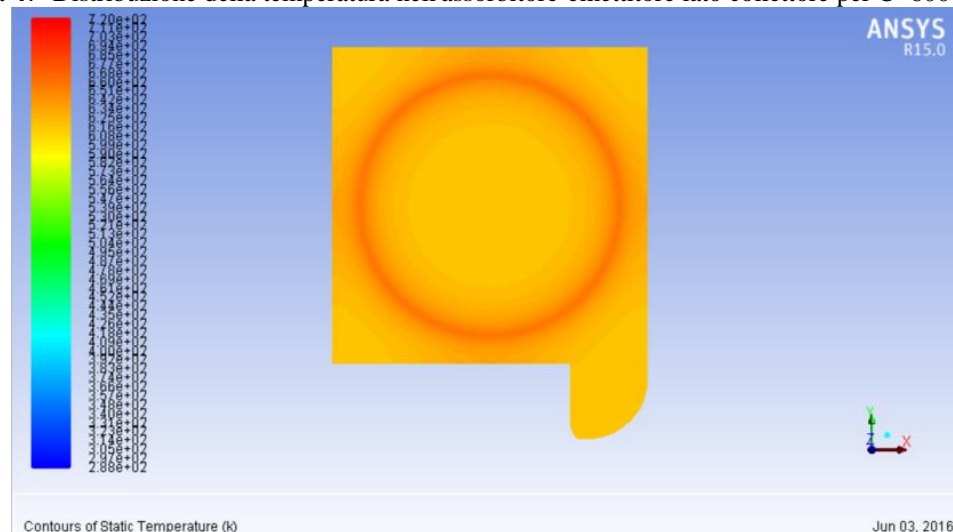
**Figura 7. 45** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per  $C=600$  soli



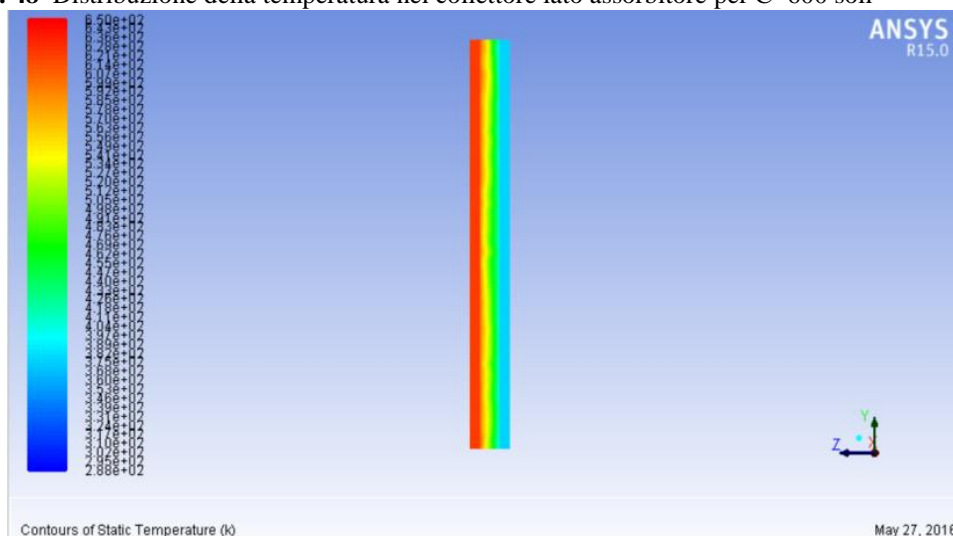
**Figura 7. 46** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=600$  soli



**Figura 7. 47** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=600$  soli



**Figura 7. 48** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=600$  soli

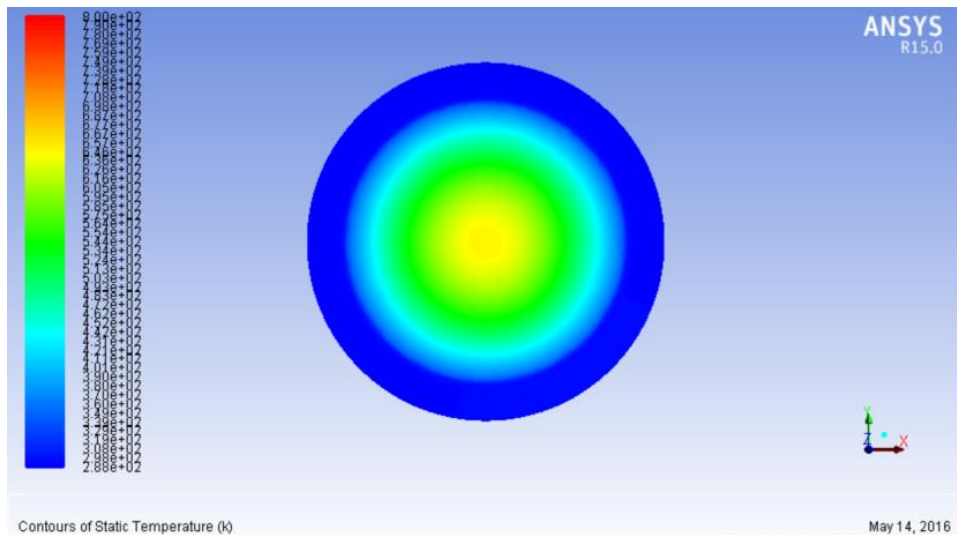


**Figura 7. 49** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=600$  soli

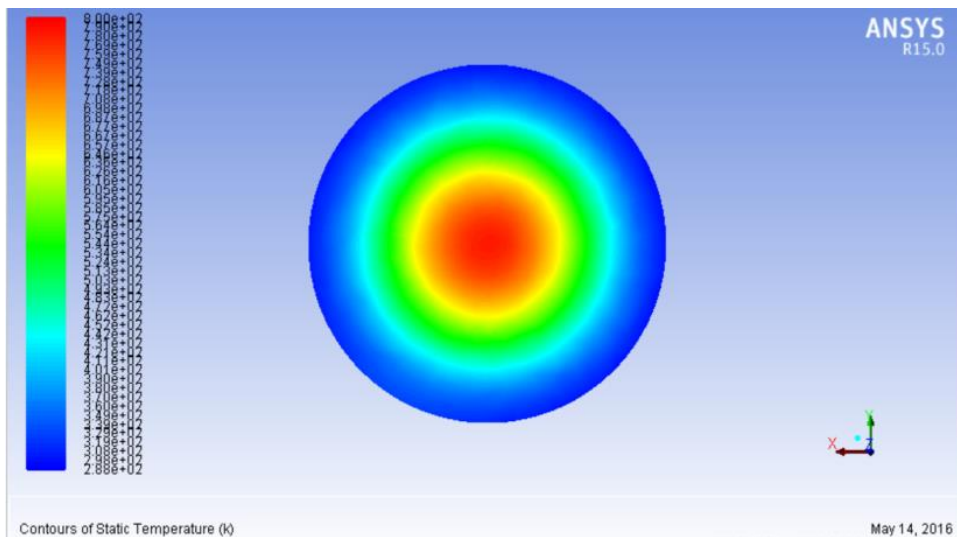
Il collettore, Figura 7. 48, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a  $370\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa  $340^{\circ}\text{C}$

Nelle Figura 7. 49 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 333 °C mentre il lato freddo 96 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 50 e Figura 7. 51, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 519 °C contro i 521 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore.



**Figura 7. 50** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli



**Figura 7. 51** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 490 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 53,4 W, di cui 5,3 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 49,5 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 436,9 W.



Nel collettore la potenza entrante è pari a 269,6 W di cui 265,4 W sono scambiati per conduzione e 5,2 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 55 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,51 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 216,1 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 216,1 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 10,8 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,51 W e la restante potenza, 204,8 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

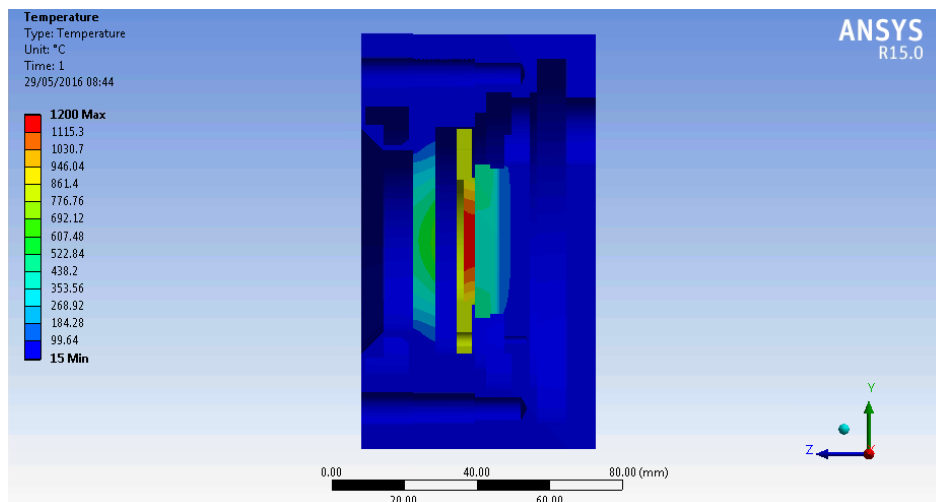
Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 50 W, di cui 23,85 W vengono scambiati con il dissipatore, 10,63 W per conduzione con la flangia e 14,29 W per convezione con l'esterno.

Si affronta ora il caso con fattore di concentrazione pari a 700 soli.

In Figura 7. 52 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento alla Figura 7. 1.

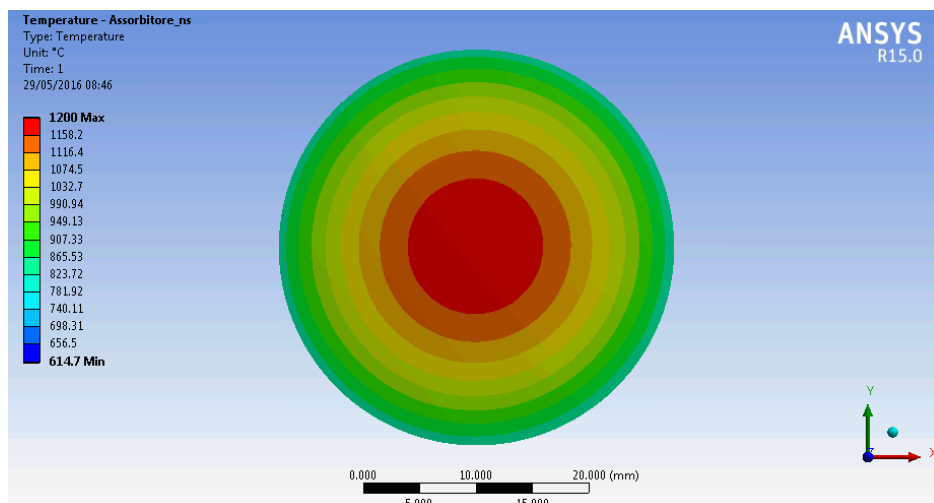
Nell'assorbitore, Figura 7. 53 e Figura 7. 54, la temperatura massima, 1200 °C, si raggiunge nella zona di ingresso della radiazione. La temperatura va diminuendo verso la zona periferica dove l'assorbitore si interfaccia con la ghiera di sostegno e l'anello distanziatore.

Nel collettore, Figura 7. 55, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Come nel caso precedente si ritrova una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. La zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore è dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra. Sul lato posteriore la distribuzione si discosta leggermente da quella ottenuta nel caso di C=600 soli, in quanto la zona a temperatura maggiore occupa un'area maggiore, ma la temperatura si mantiene circa omogenea e pari a 440 °C.

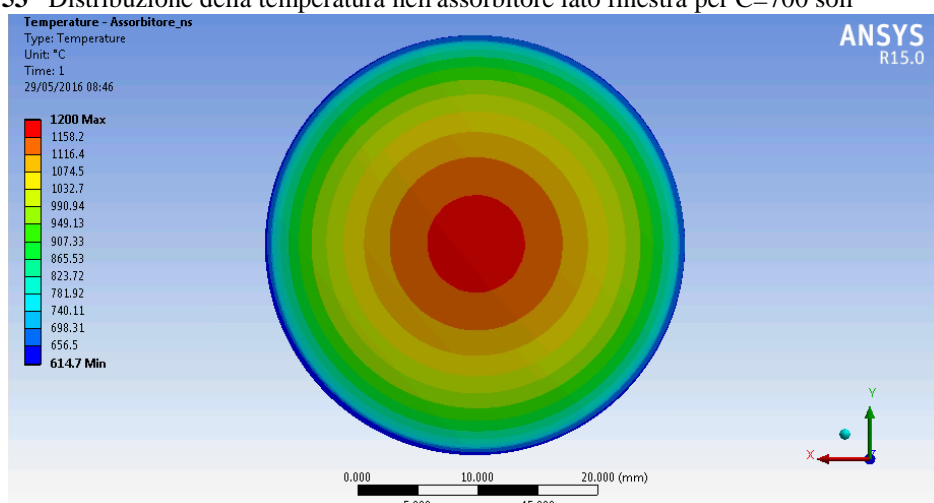


**Figura 7. 52** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli

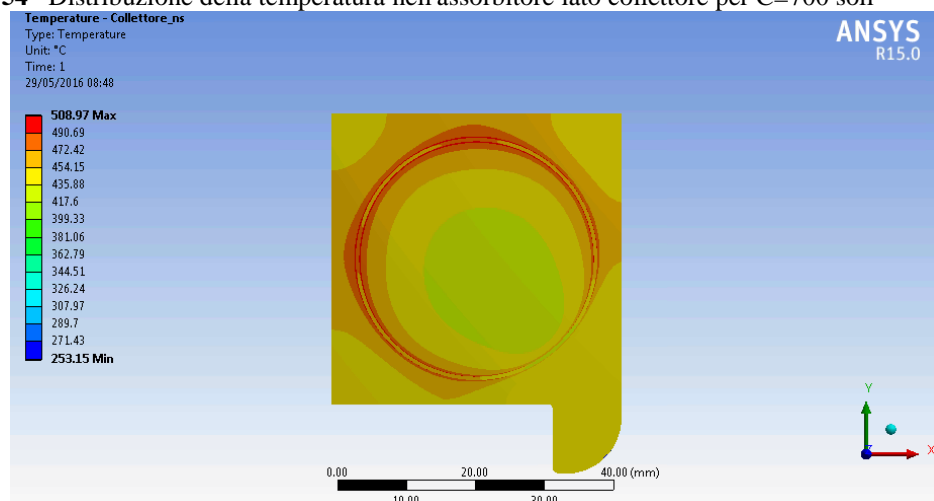
Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 637 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sulla lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 135°C.



**Figura 7. 53** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli



**Figura 7. 54** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli

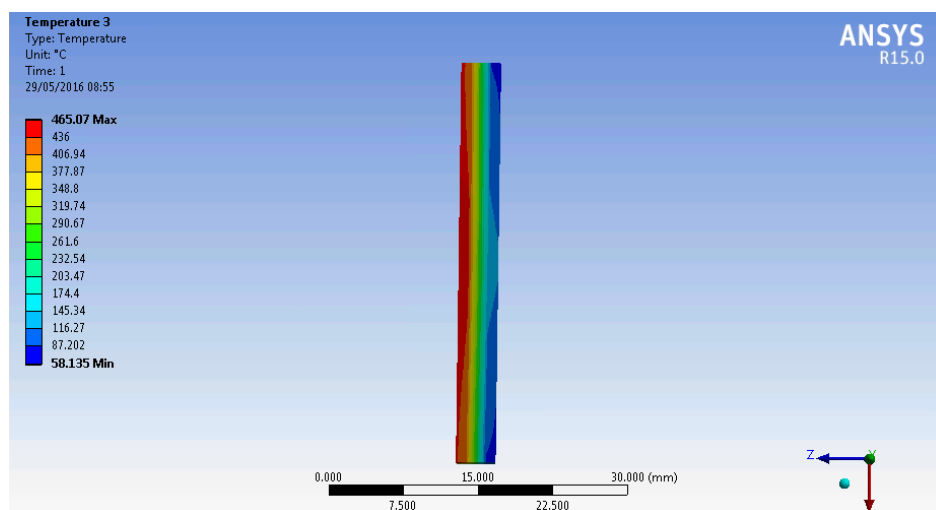


**Figura 7. 55** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 7e Figura 7. 8, ma in un range di temperatura compreso tra 654,56 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 517 inferiore rispetto a quella raggiunta



sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

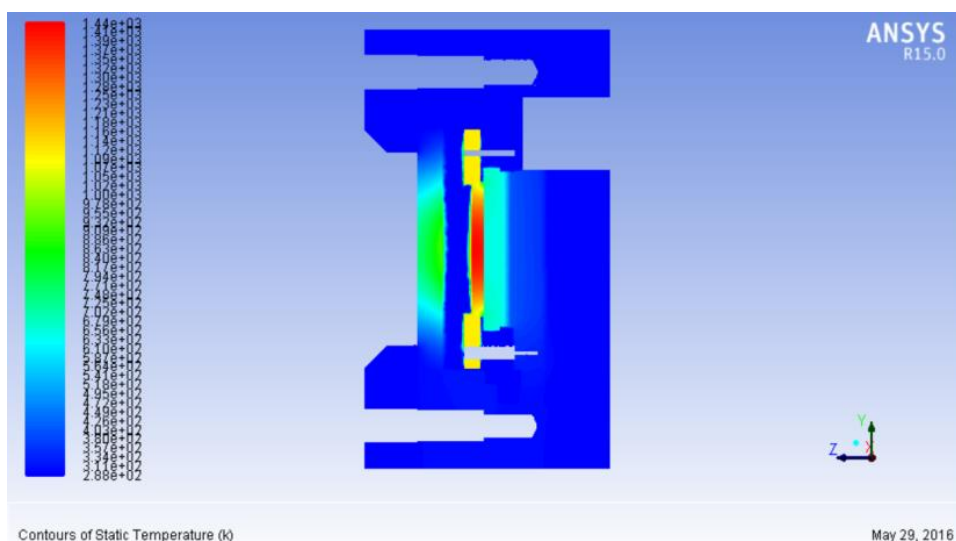


**Figura 7. 56** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli

Di seguito si riportano le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent.

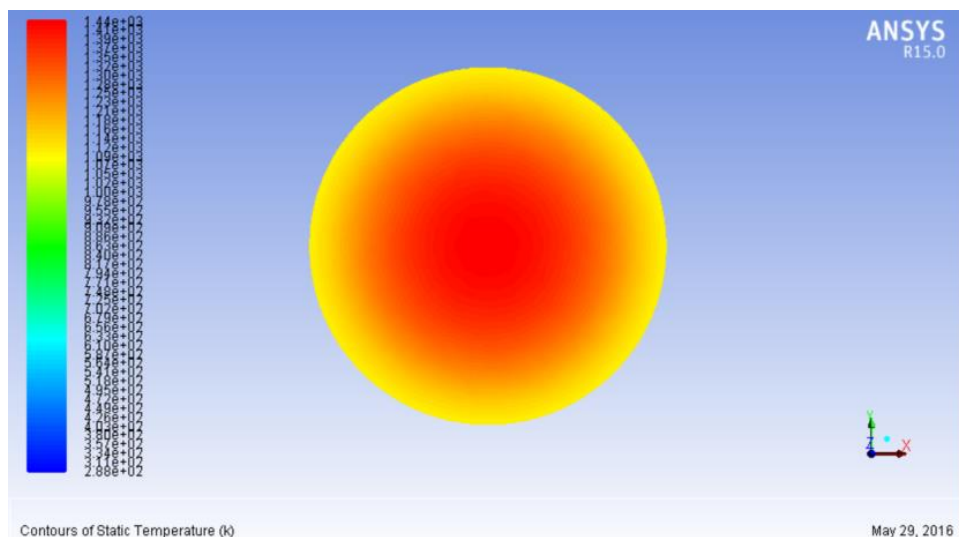
In Figura 7. 57 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 58 e Figura 7. 59, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 1163 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è raggiunta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 421 °C.

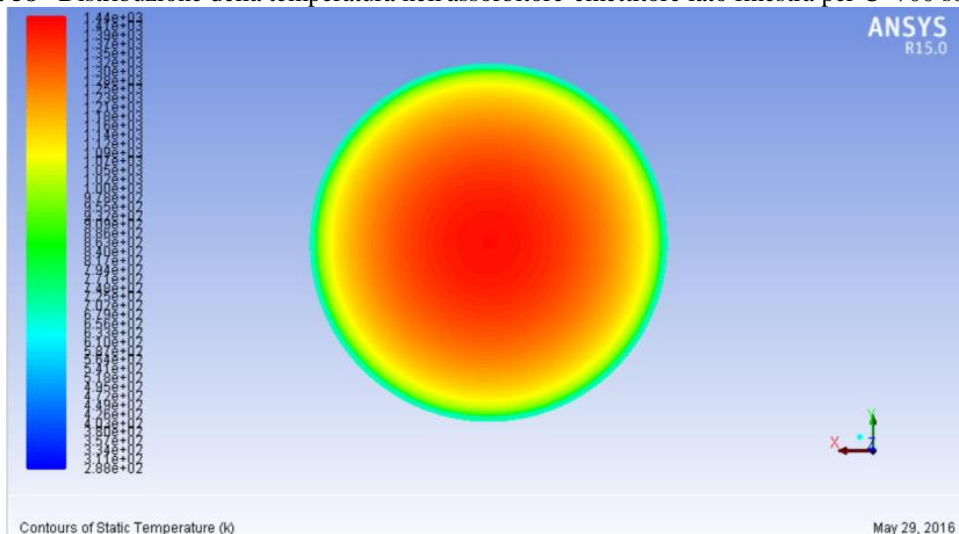


**Figura 7. 57** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli

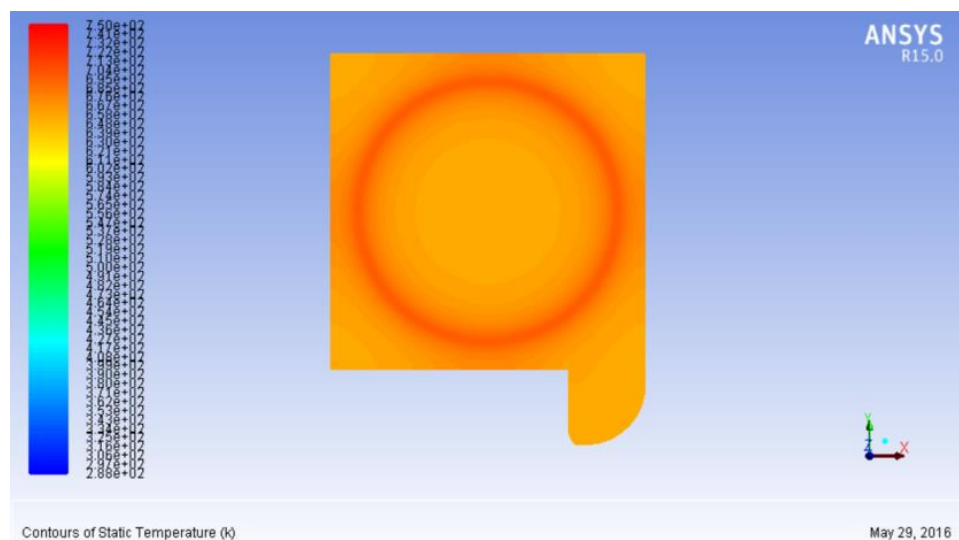
Il collettore, Figura 7. 60, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 406 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 388°C, ma a differenza del caso su Steady State.



**Figura 7. 58** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli



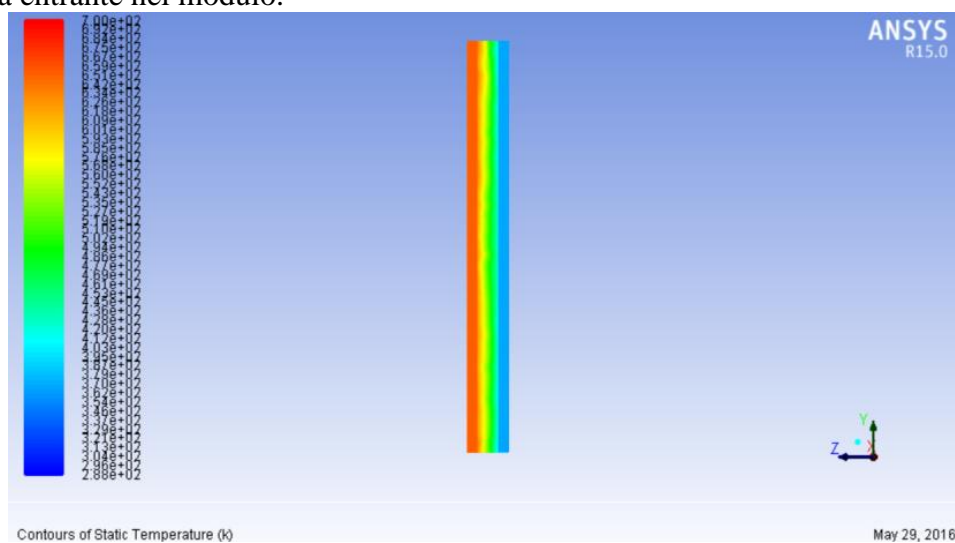
**Figura 7. 59** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli



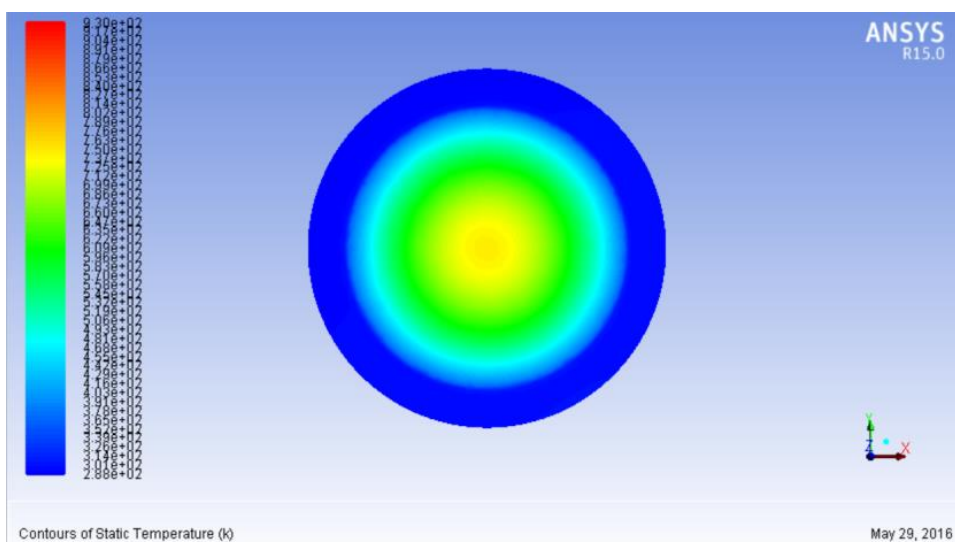
**Figura 7. 60** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli

Nelle Figura 7. 61 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 378 °C mentre il lato freddo 111 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la

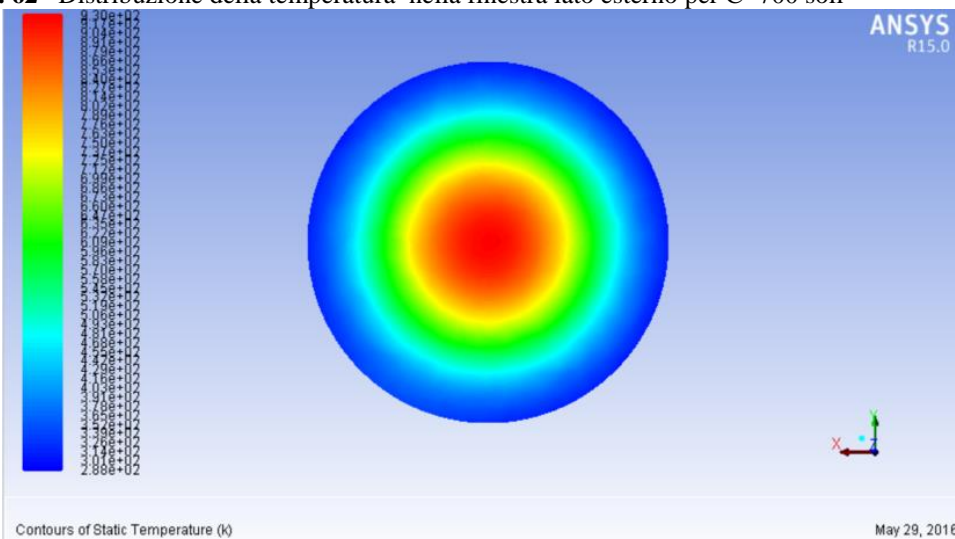
presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.



**Figura 7. 61** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli



**Figura 7. 62** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli



**Figura 7. 63** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli

La temperatura nella finestra (Figura 7. 62 e Figura 7. 63) rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 649 °C contro i 654,5 °C della simulazione con Steady State. Ciò è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 571 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 72,4 W, di cui 7,42 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e dei restanti Watt circa 62,7 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 498 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 276,4 W di cui 269 W sono scambiati per conduzione e 7,4 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 59 W scambiati per conduzione con la flangia finestrata, 0,60 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 217 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

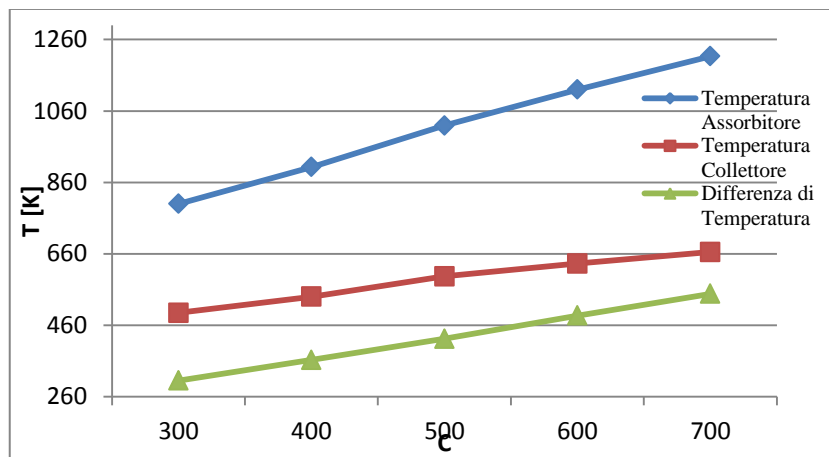
La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 217 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 11 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,57 W e la restante potenza, 205,4 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 65,3 W, di cui 31,1 W vengono scambiati con il dissipatore, 14,59 W per conduzione con la flangia e 19,61 W per convezione con l'esterno.

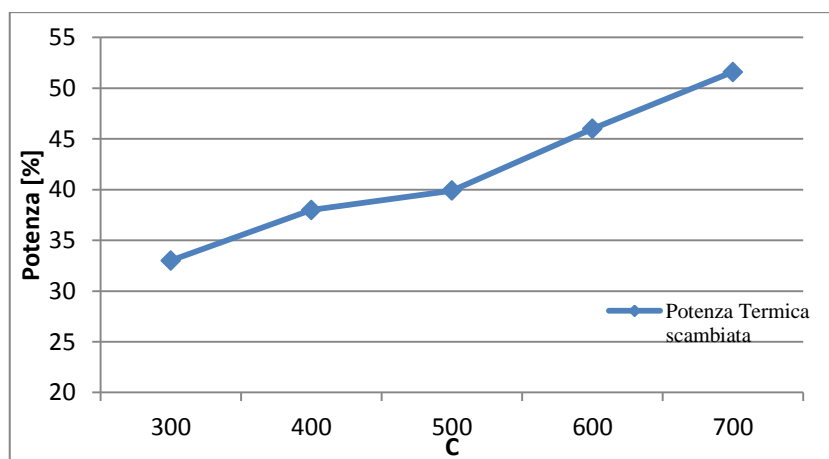
In Figura 7. 64 si può osservare la temperatura media della superficie attiva dell'emettitore e della superficie attiva del collettore aumenta all'aumentare del fattore di concentrazione della radiazione solare. Come si può notare la differenza di temperatura aumenta all'aumentare della potenza entrante poiché cresce la percentuale di potenza termica che l'emettitore disperde con finestra, ghiera di sostegno, Flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia, Figura 7. 66. Quindi all'aumentare del fattore di concentrazione si ha il duplice vantaggio dell'aumento della temperatura dell'emettitore e della differenza di temperatura tra emettitore e collettore.

In Figura 7. 66 e Figura 7. 67 si riportano gli andamenti della densità di corrente e della potenza prodotta dal modulo termoelettrico. In tale caso non essendo stato possibile applicare le formule semplificate per il calcolo della densità di a causa dei fenomeni di carica spaziale non sono trascurabili, si è utilizzato il programma scritto con MathWork. Come si può notare l'andamento è esponenziale all'aumentare della radiazione entrante. Infatti la densità di corrente dipende fortemente dalla temperatura dell'emettitore e dalla differenza di temperatura tra i due elettrodi. Come si era preannunciato, i valori della densità di corrente e della potenza prodotta sono valori infinitesimi rispetto alle altre potenze in gioco.

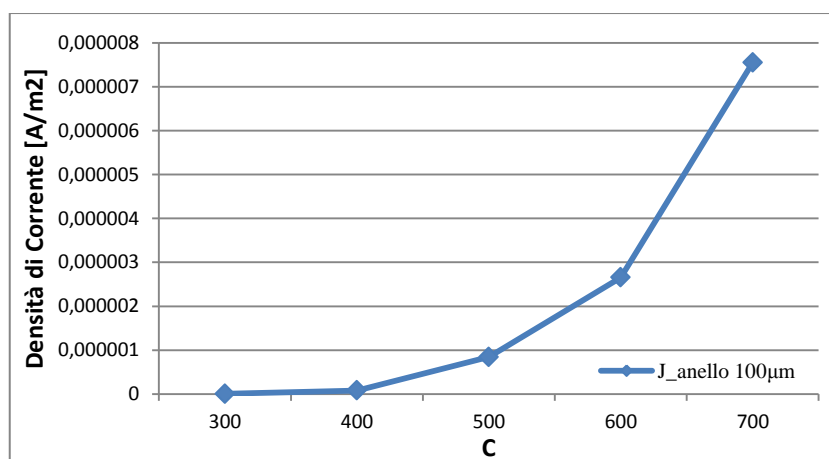
In Figura 7. 68 e Figura 7. 69 si riportano le temperature medie del lato caldo e del lato freddo del modulo termoelettrico e la potenza prodotta dal modulo per diversi fattori di concentrazione. Anche in questo caso le temperature aumentano all'aumentare della radiazione entrante poiché come si è visto dall'analisi delle potenze aumenta la potenza entrante nel modulo. La potenza prodotta, calcolata come il 5% della potenza termica entrante, aumenta con il fattore d. concentrazione per lo stesso motivo.



**Figura 7. 64** Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termioionico

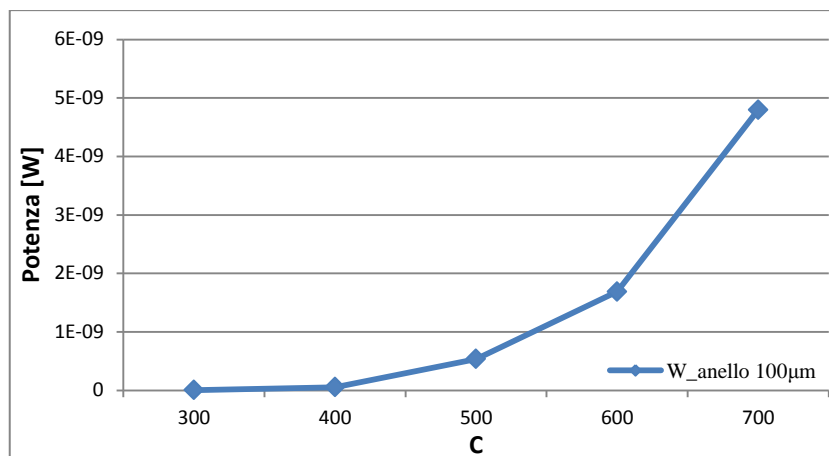


**Figura 7. 65** Andamento della perdite di potenza termica scambiata dall'assorbitore-emettitore con ghiera, finestra e flangia

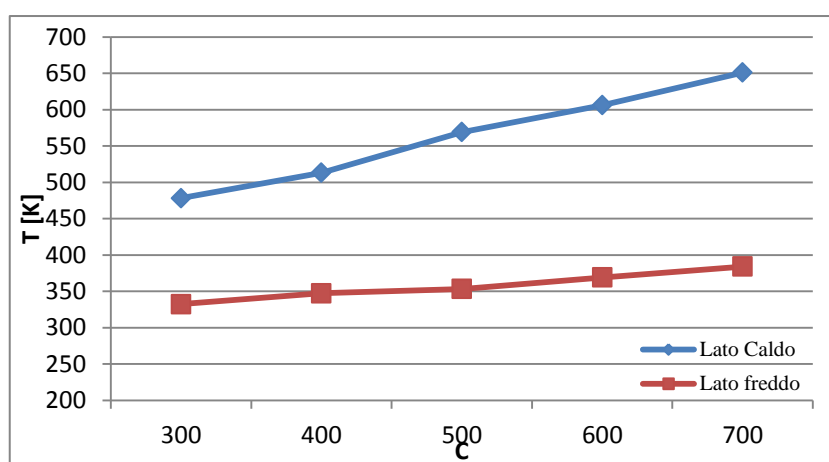


**Figura 7. 66** Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione

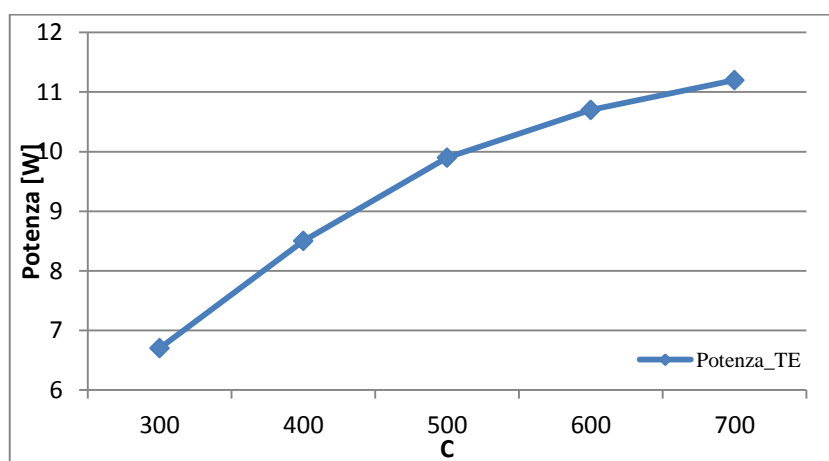
Dal confronto tra la potenza prodotta dal modulo TI e quella prodotta dal modulo TE è evidente che in questo caso il componente di produzione è il modulo termoelettrico.



**Figura 7. 67** Andamento della potenza prodotta dal modulo termoionico al variare del fattore di concentrazione della radiazione



**Figura 7. 68** Andamento temperature nel modulo termoelettrico



**Figura 7. 69** Andamento potenza prodotta dal modulo termoelettrico

## 7.2 Anello da 10 $\mu\text{m}$

Di seguito si riporteranno le immagini relative alle distribuzioni di temperatura ottenute con il programma Steady State e con Fluent e i flussi termici ricavati dall'analisi su Fluent per differenti fattori di concentrazione, 300, 400, 500, 600 e 700 soli.

Come si è spiegato nel capitolo precedente, l'ampiezza del gap interelettrodico è tale da inibire il formarsi di effetti di carica spaziale. Questo permette di sfruttare le equazioni (40), (41), (43) e (46) per calcolare la potenza prodotta dal modulo termoionico e i relativi tassi di raffreddamento e riscaldamento elettronico. In particolare la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento elettronico vengono imposti come flussi di calore uscenti dalla superficie attiva dell'emettitore, mentre il tasso di riscaldamento elettronico viene imposto come flusso entrante nella superficie attiva. Le differenze di temperatura che si riscontrano tra l'analisi su Steady State e quella su Fluent sono dovute anche a questi flussi imposti oltre che all'introduzione dell'acqua negli scambiatori.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 300 soli.

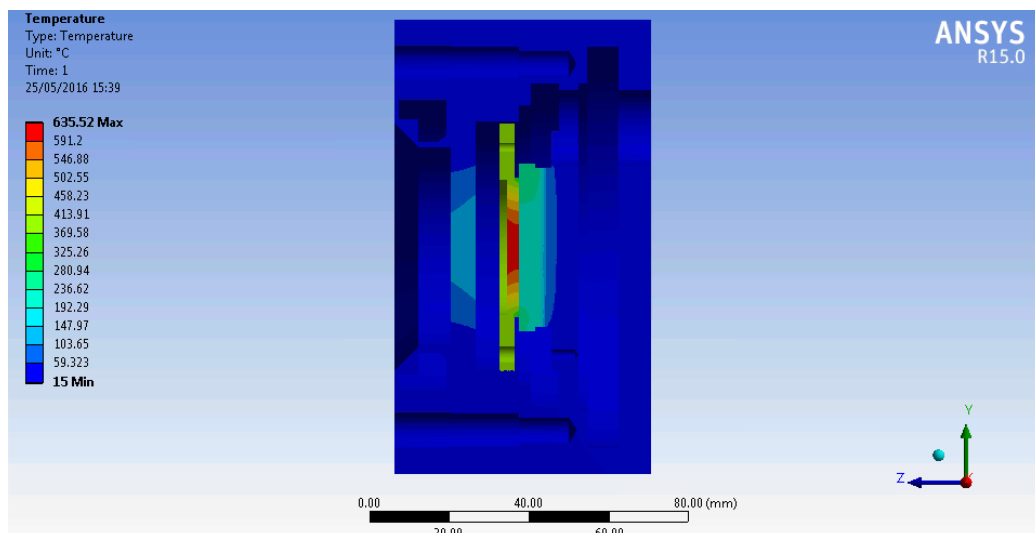


Figura 7. 70 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli

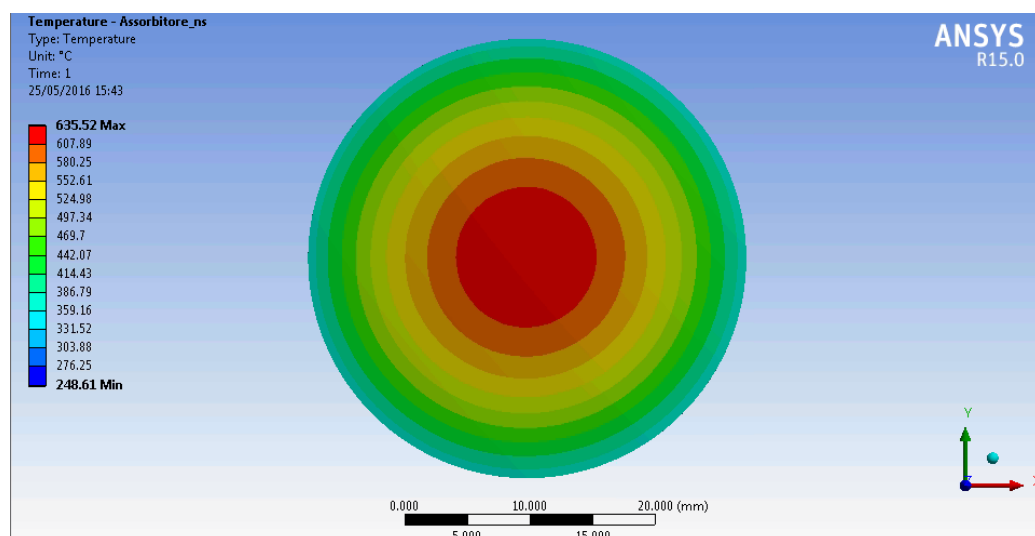
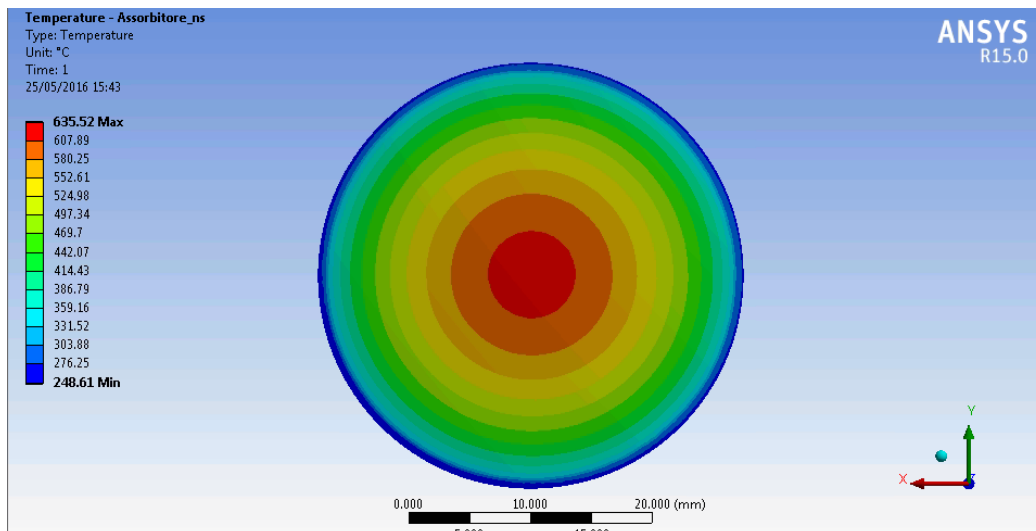
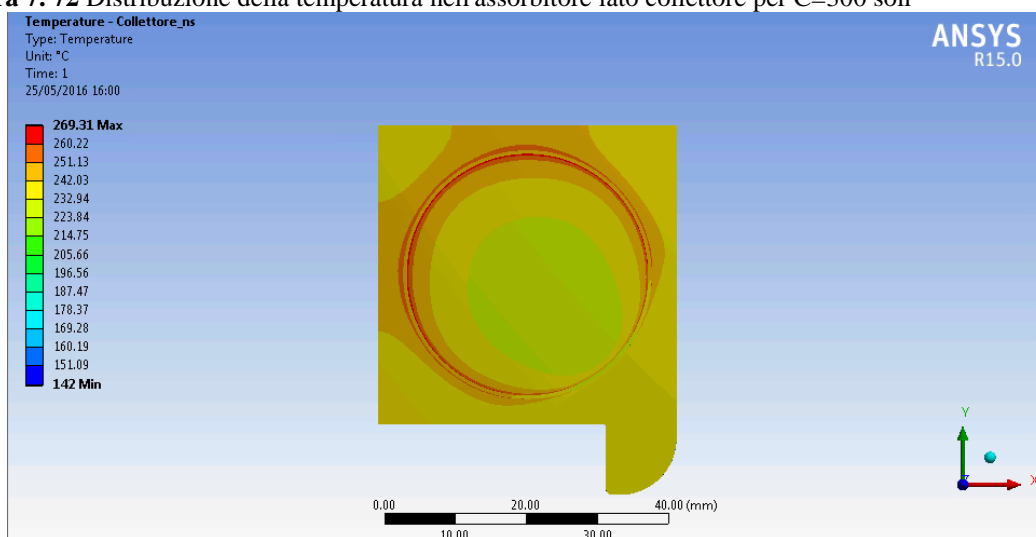


Figura 7. 71 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli



**Figura 7. 72** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli



**Figura 7. 73** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli

In Figura 7. 70 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. I valori di temperatura sono riportati in °C. Per comprendere meglio Figura 7. 70 si fa riferimento a Figura 7. 1.

La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 635,57 °C. Tale valore è inferiore rispetto a quello ottenuto nel caso con anello distanziatore da 100 µm. Lo spessore inferiore del distanziatore comporta una maggiore dispersione di calore verso il collettore che si porta infatti ad una temperatura maggiore.

In questa immagine a causa dell'ampio range di temperatura non è apprezzabile la distribuzione di temperatura nel collettore e nel modulo termoelettrico, benché si possa già notare una zona di riscaldamento nel collettore all'interfaccia con il distanziatore.

Come si può notare in Figura 7. 72 e Figura 7. 73 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello.

Nel collettore, Figura 7. 74, si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. I flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra. La



superficie del collettore che interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 248 °C.

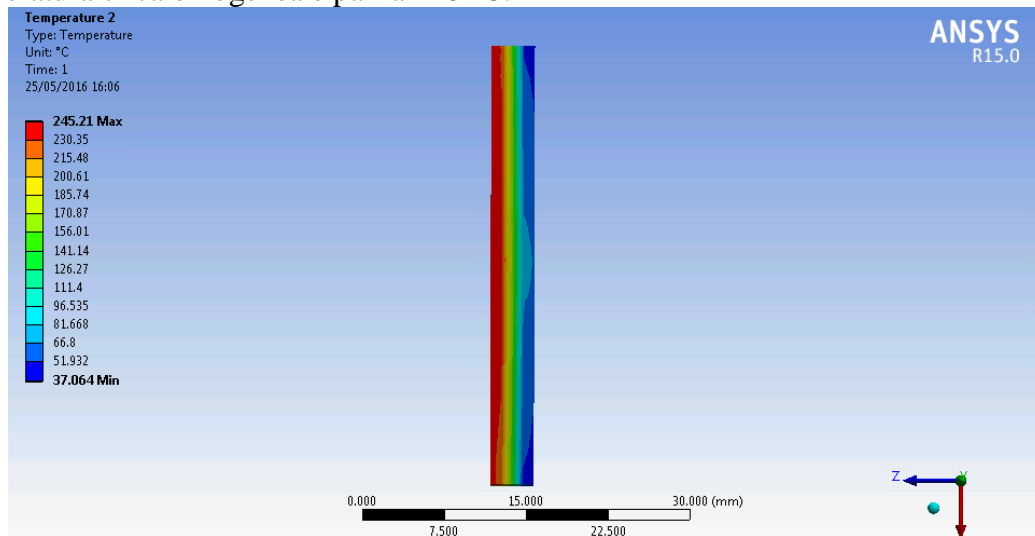


Figura 7. 74 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli

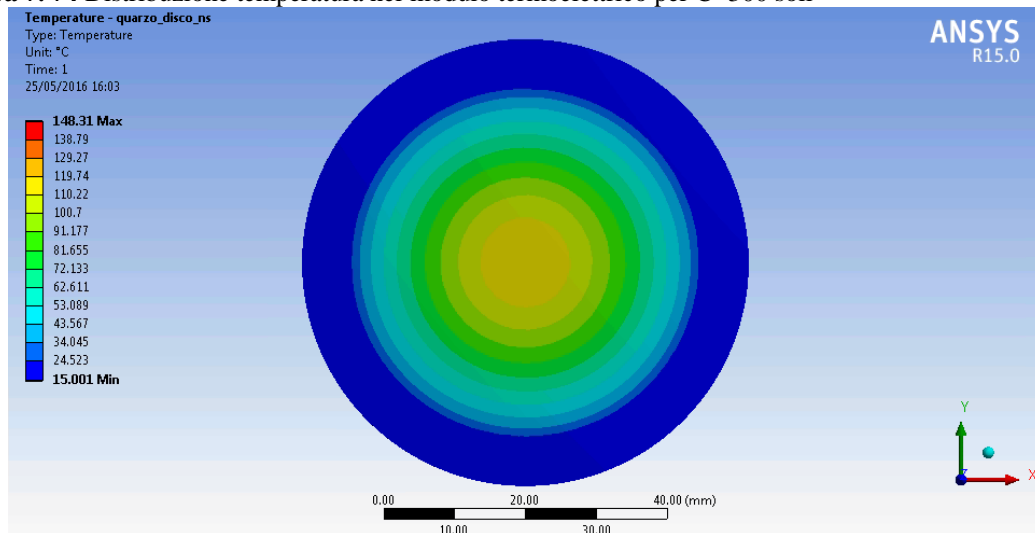


Figura 7. 75 Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli

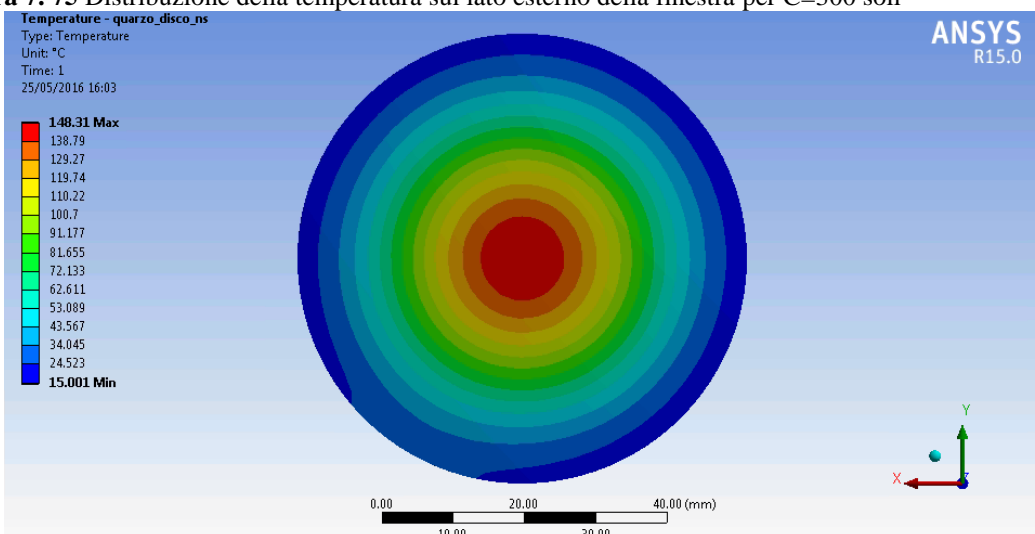
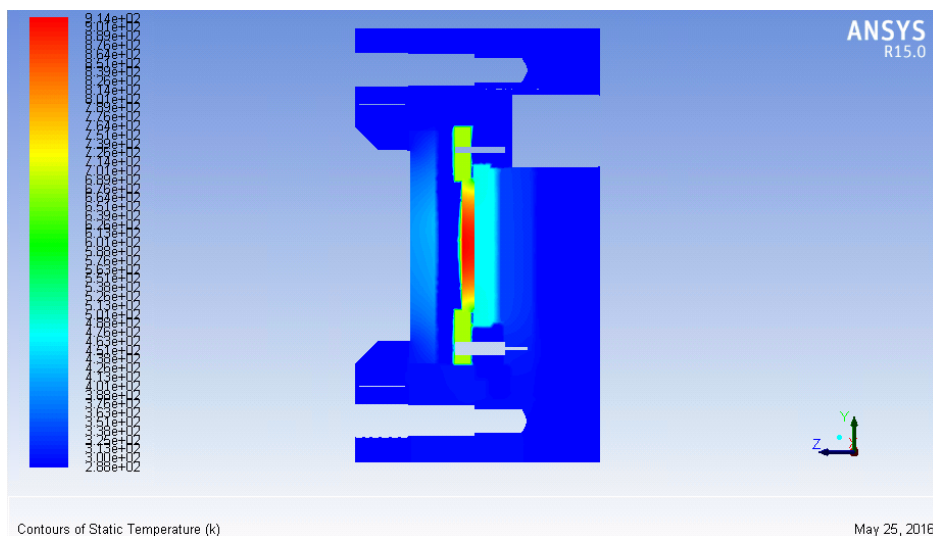


Figura 7. 76 Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli

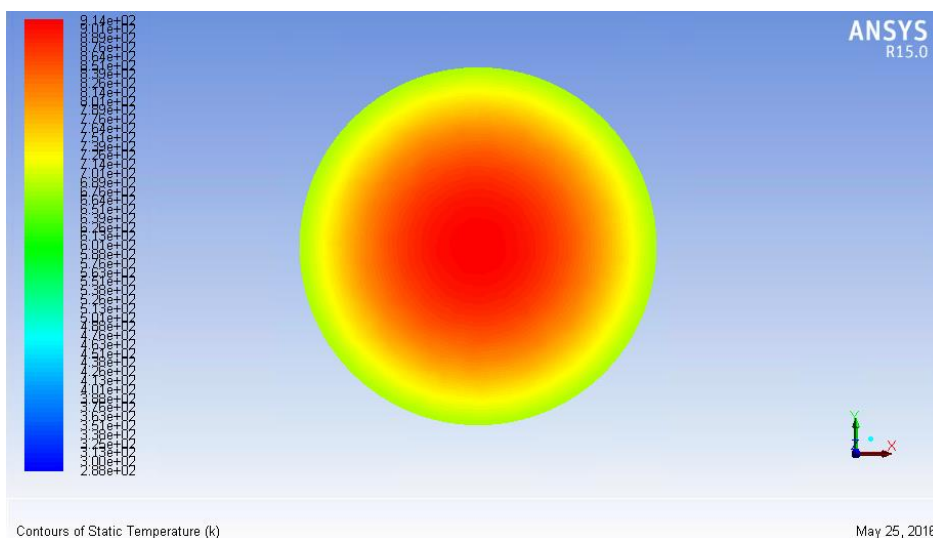
Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a  $240^{\circ}\text{C}$ . Tale componente raggiunge una temperatura massima più elevata rispetto al caso con anello da  $100\text{ }\mu\text{m}$  e la motivazione è la medesima del collettore. Il lato freddo si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a  $72^{\circ}\text{C}$ .

La finestra, Figura 7. 75 e Figura 7. 76, raggiunge la massima temperatura, pari a  $148,31^{\circ}\text{C}$  contro i  $164,87^{\circ}\text{C}$ , del caso da  $100\text{ }\mu\text{m}$ . Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa  $120^{\circ}\text{C}$  inferiore rispetto a quella raggiunta sull'altro lato, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



**Figura 7. 77** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=300 soli

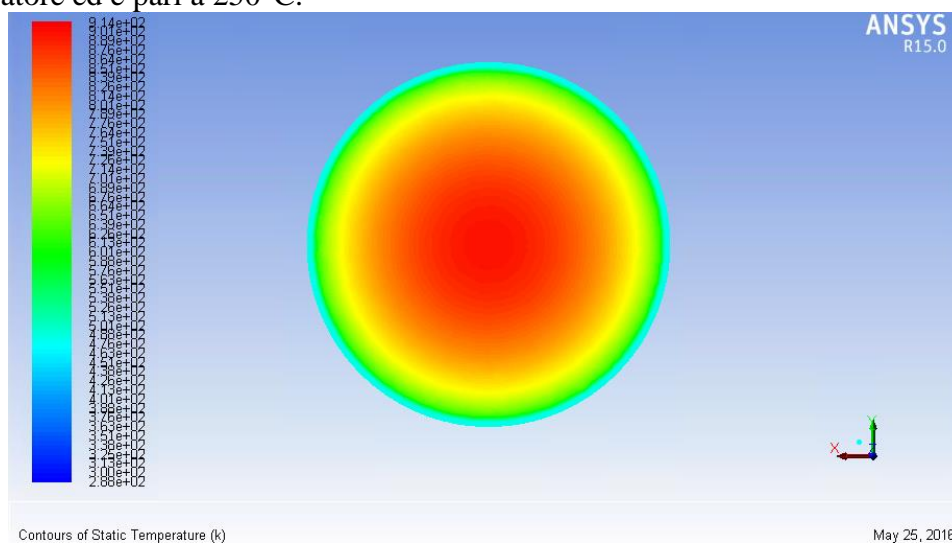


**Figura 7. 78** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli

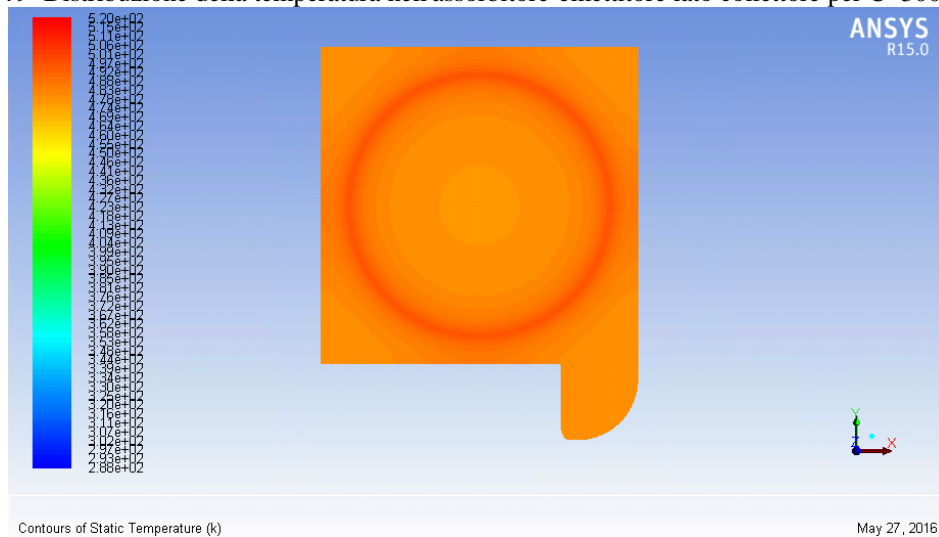
In Figura 7. 77 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 78 e Figura 7. 79, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a  $630^{\circ}\text{C}$ , è leggermente

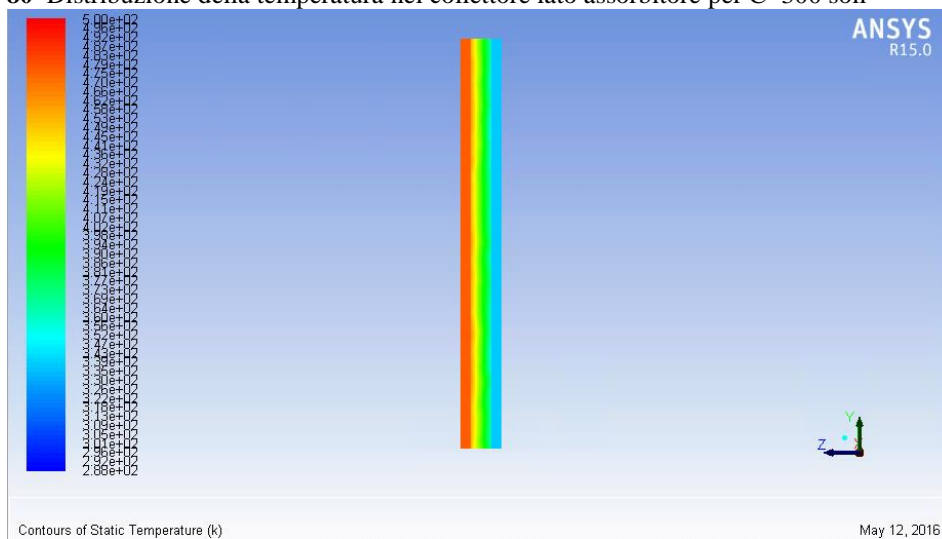
inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a  $250^{\circ}\text{C}$ .



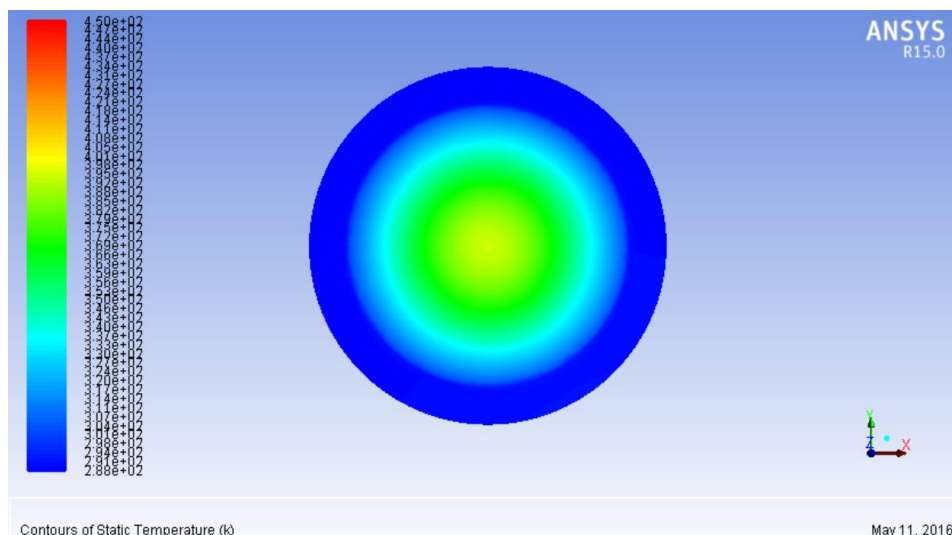
**Figura 7. 79** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=300$  soli



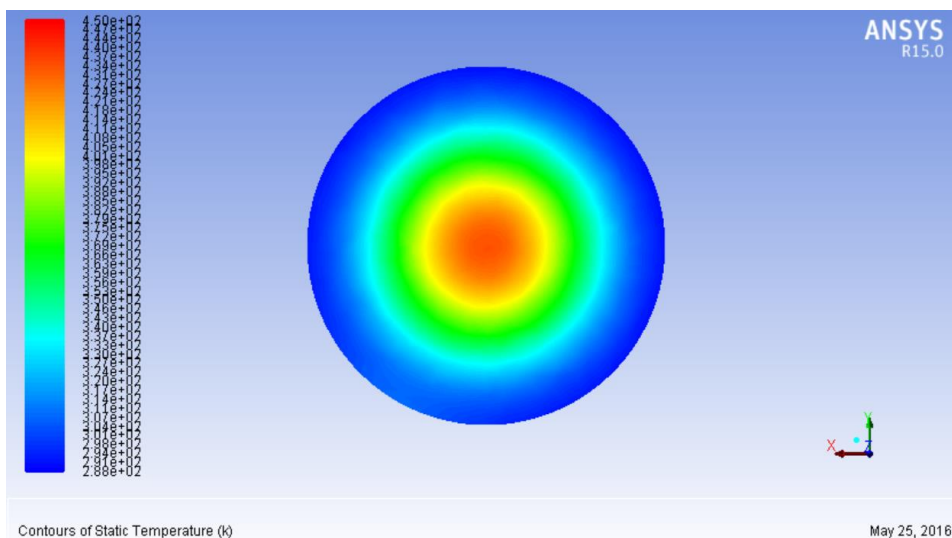
**Figura 7. 80** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=300$  soli



**Figura 7. 81** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=300$  soli



**Figura 7. 82** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli



**Figura 7. 83** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli

Il collettore, Figura 7. 80, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 245 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 223 °C.

In Figura 7. 81 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 215 °C mentre il lato freddo 65,8 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso simulato in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 82 e Figura 7. 83, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 140 °C contro i 148 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 245 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 11,44 W, di cui 1,1 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 10,2 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 0,01 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 233 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 167,5 W di cui 166,4 W sono scambiati per conduzione e 1,08 W per irraggiamento e 0,005 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 27 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,12 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 140,4 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 140,4 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 7 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,23 W. la restante potenza, 133 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 9,48 W, di cui 5,15 W vengono scambiati con il dissipatore, 2,87 W per conduzione con la flangia e 1,45 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 400 soli.

In Figura 7. 83 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento a Figura 7. 1. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 810,75 °C, tale valore è inferiore rispetto a quello ottenuto nel caso con anello distanziatore da 100 µm poiché lo spessore inferiore del distanziatore comporta una maggiore dispersione di calore verso il collettore che si porta infatti ad una temperatura maggiore.

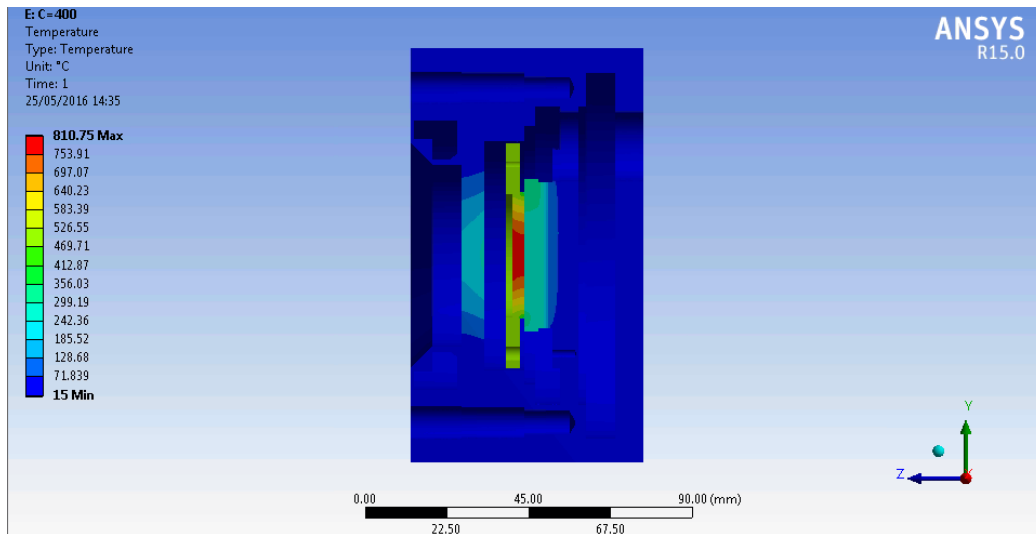
Come si può notare in Figura 7. 85 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. Anche in questo caso l'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera Figura 7. 85 e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello Figura 7. 86.

Nel collettore, Figura 7. 86, si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Si ritrova la zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchia del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra. La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura quasi omogenea e pari a 304 °C.

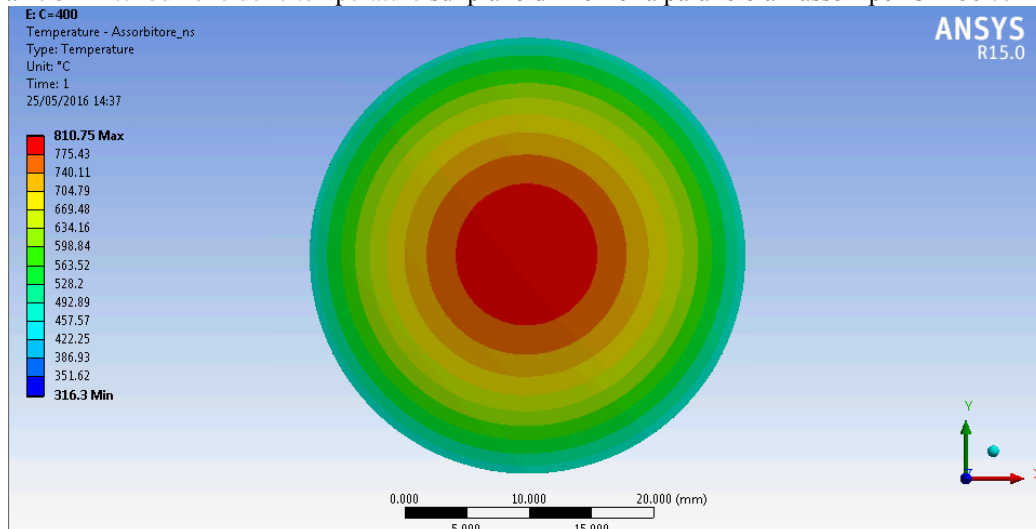
Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 293 °C. Tale componente raggiunge una temperatura massima più elevata rispetto al caso con anello da 100 µm e la motivazione è la medesima del collettore. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 92°C.

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 82 e Figura 7. 83, ma in un range di temperatura compreso tra 256,85 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno ed è inferiore a quella raggiunta nel caso con anello da 100 µm. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima

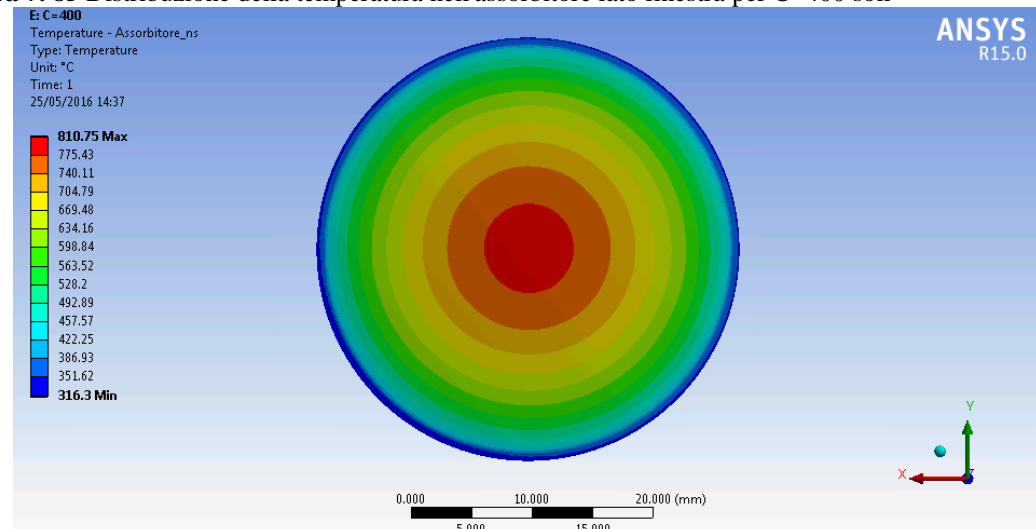
raggiunta è circa 200 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.



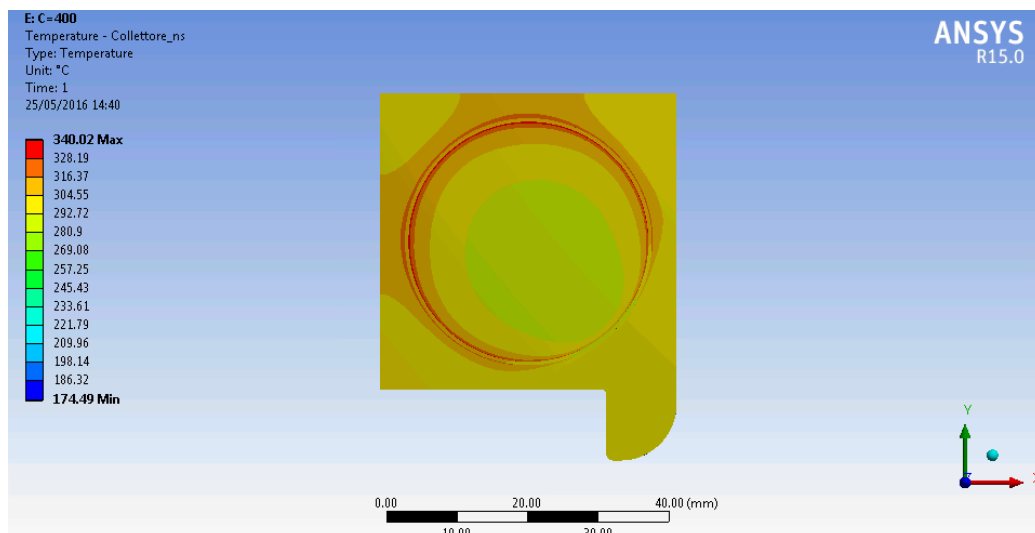
**Figura 7. 84** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli



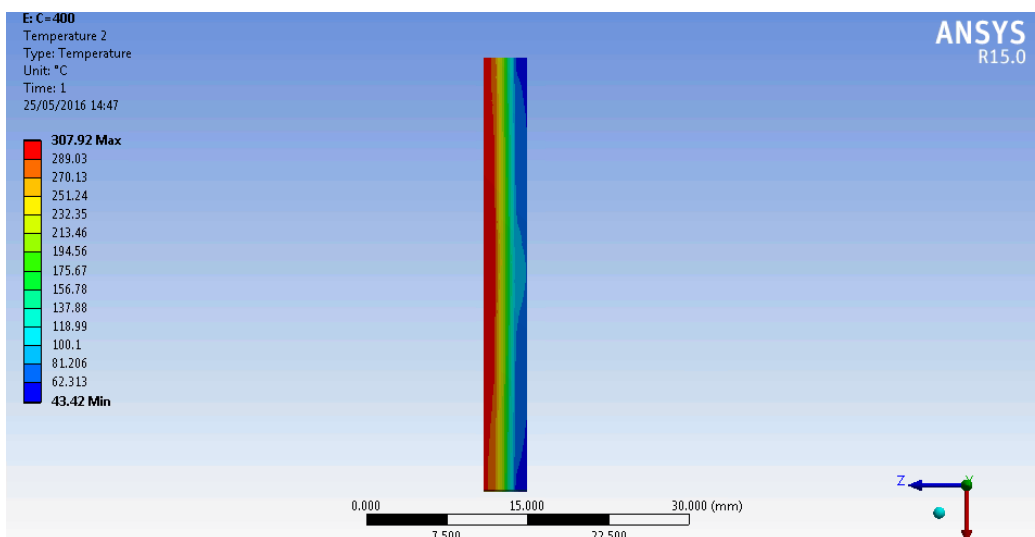
**Figura 7. 85** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli



**Figura 7. 86** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli

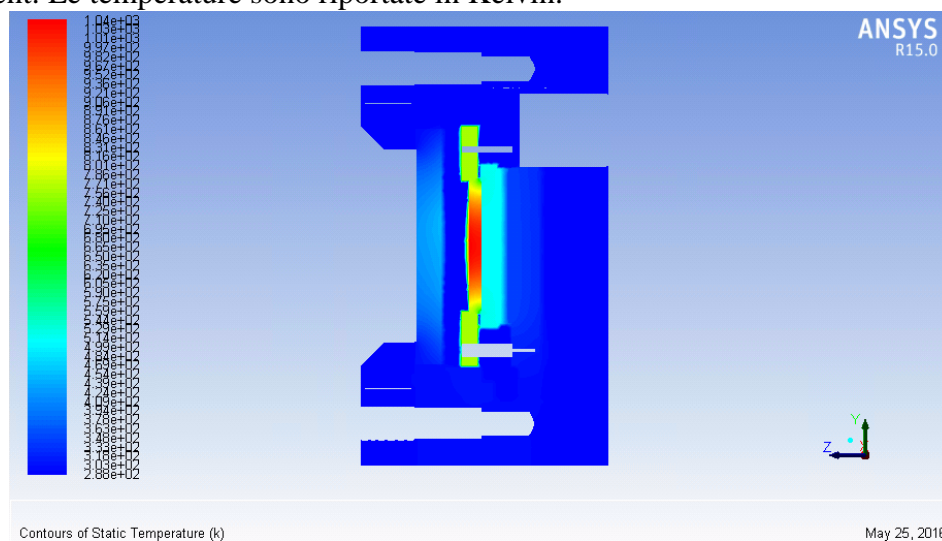


**Figura 7. 87** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli



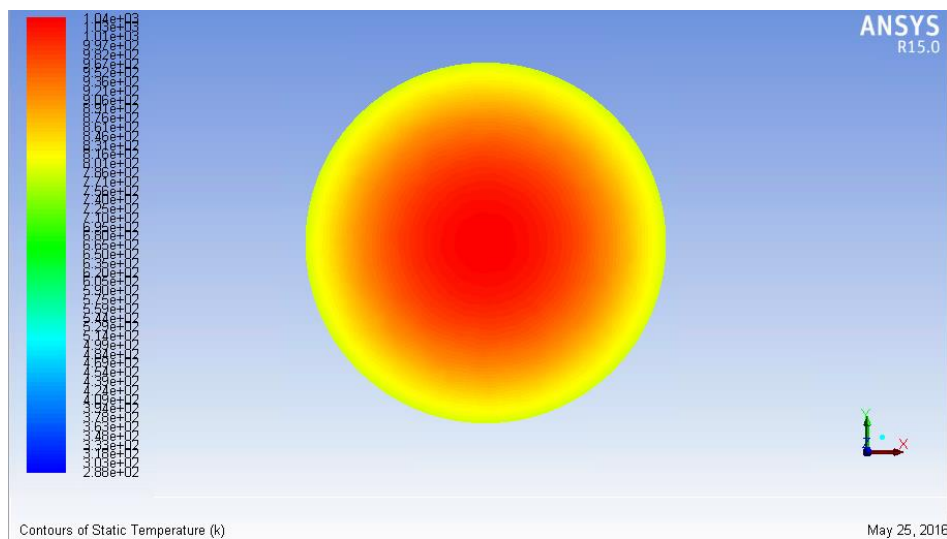
**Figura 7. 88** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

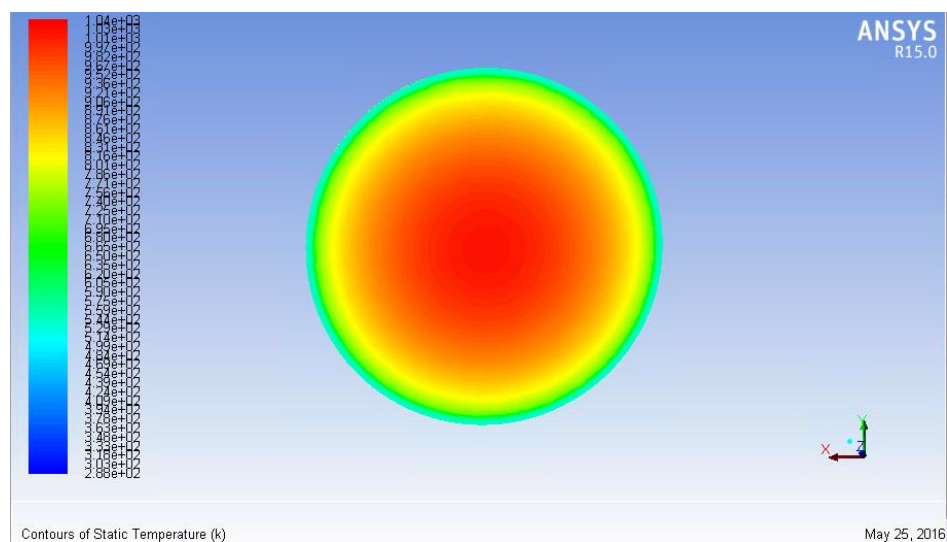


**Figura 7. 89** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli

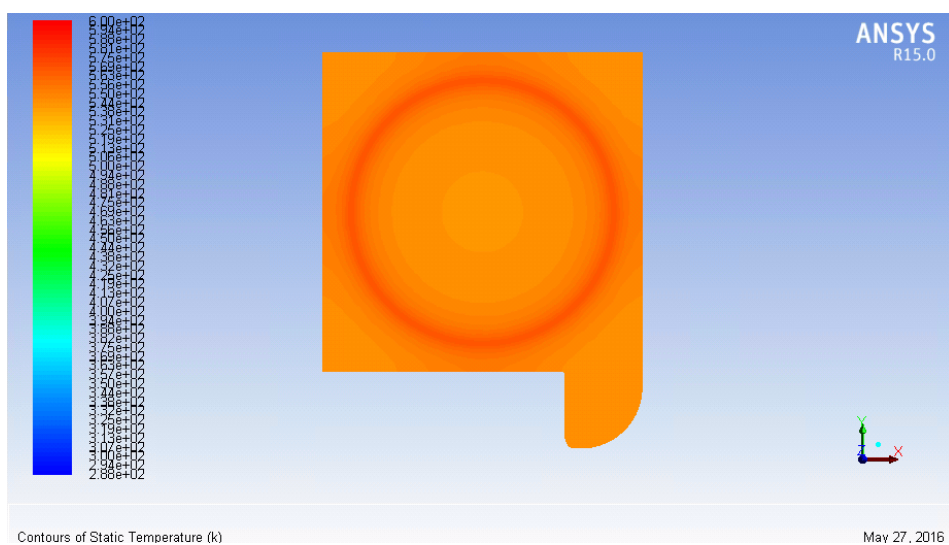




**Figura 7. 90** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli

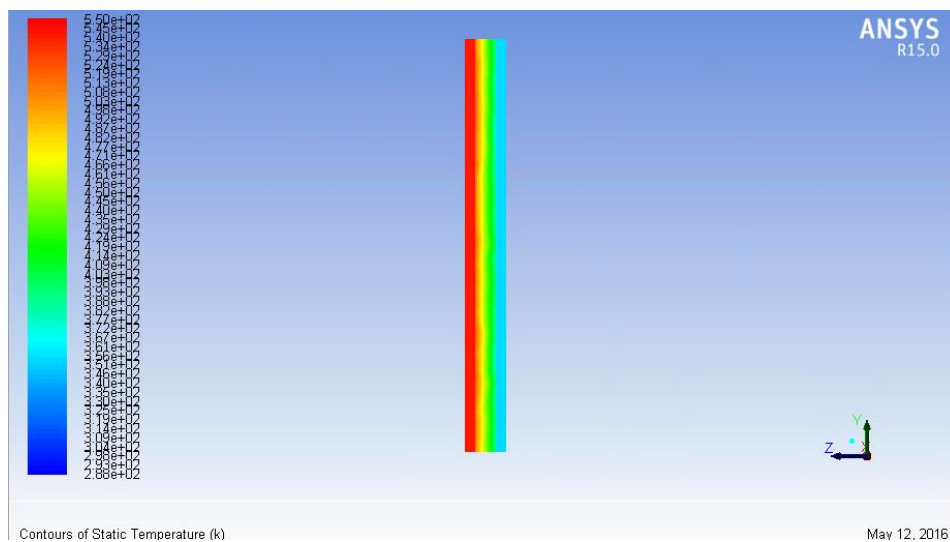


**Figura 7. 91** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=400 soli

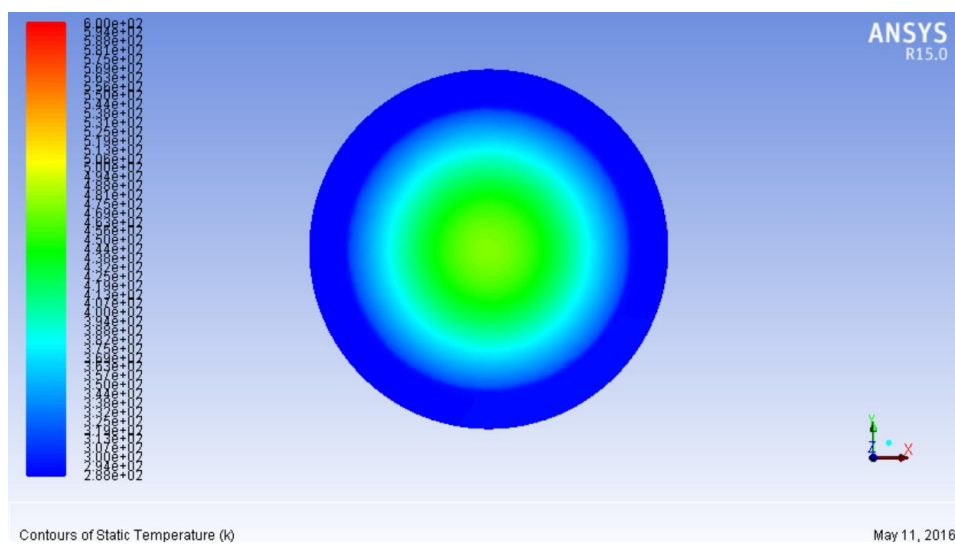


**Figura 7. 92** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli

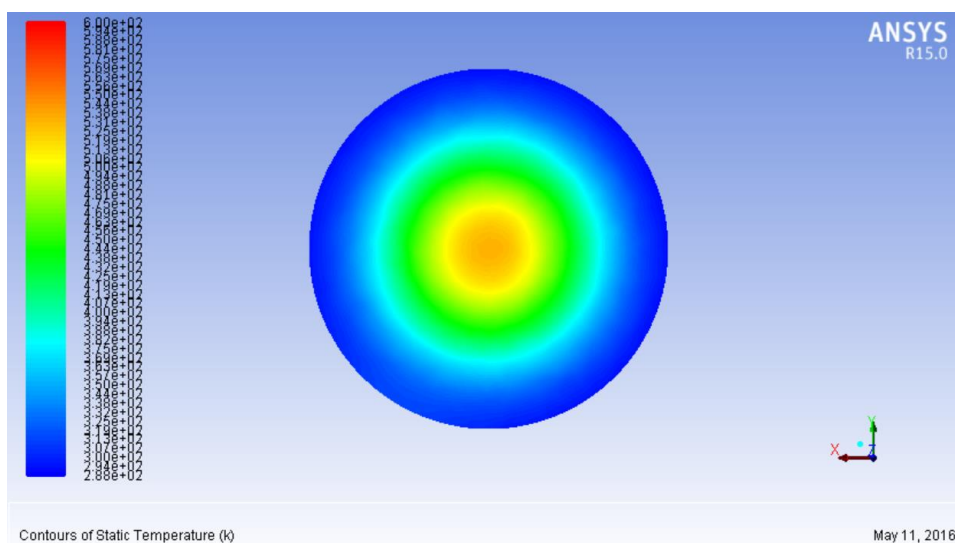




**Figura 7. 93** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli



**Figura 7. 94** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli



**Figura 7. 95** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli

In Figura 7. 89 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 90 e Figura 7. 91, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 772 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 320 °C.

Il collettore, Figura 7. 92, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 290 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 263 °C.

In Figura 7. 93 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 252 °C mentre il lato freddo 80,5 °C.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 94 e Figura 7. 95, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 250 °C contro i 256 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 326 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 21 W, di cui 1,9 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 18 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 0,11 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 305,81 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 205,85 W di cui 204 W sono scambiati per conduzione e 1,8 W per irraggiamento e 0,05 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 33 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,2 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 140,4 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 172,71 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 8,7 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,42 W. la restante potenza, 166 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 19 W, di cui 9,9 W vengono scambiati con il dissipatore, 5,8 W per conduzione con la flangia e 3,2 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 500 soli.

In Figura 7. 96 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento a Figura 7. 1. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 968,32 °C, tale valore è inferiore rispetto a quello ottenuto nel caso con anello distanziatore da 100 µm. Lo spessore

inferiore del distanziatore comporta una maggiore dispersione di calore verso il collettore che si porta infatti ad una temperatura maggiore.

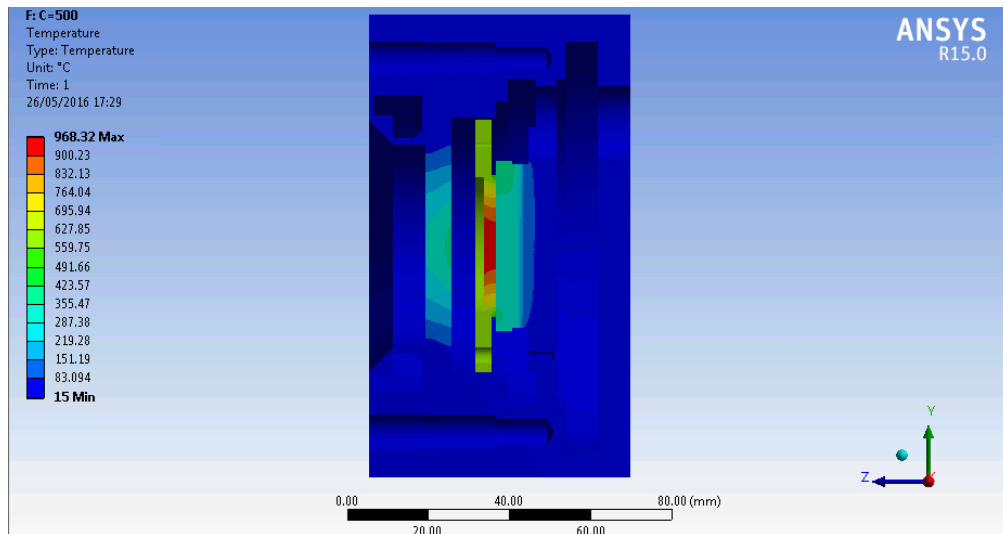


Figura 7. 96 Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli

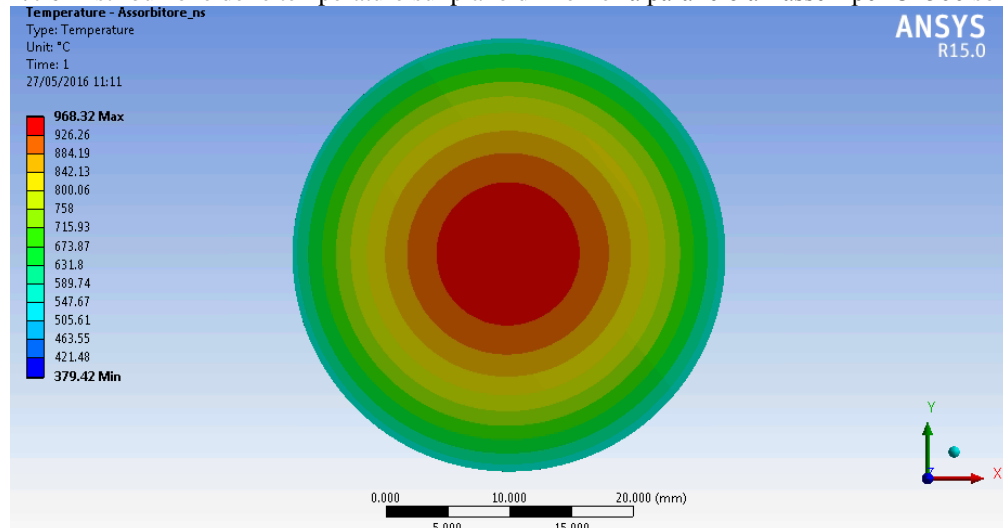


Figura 7. 97 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli

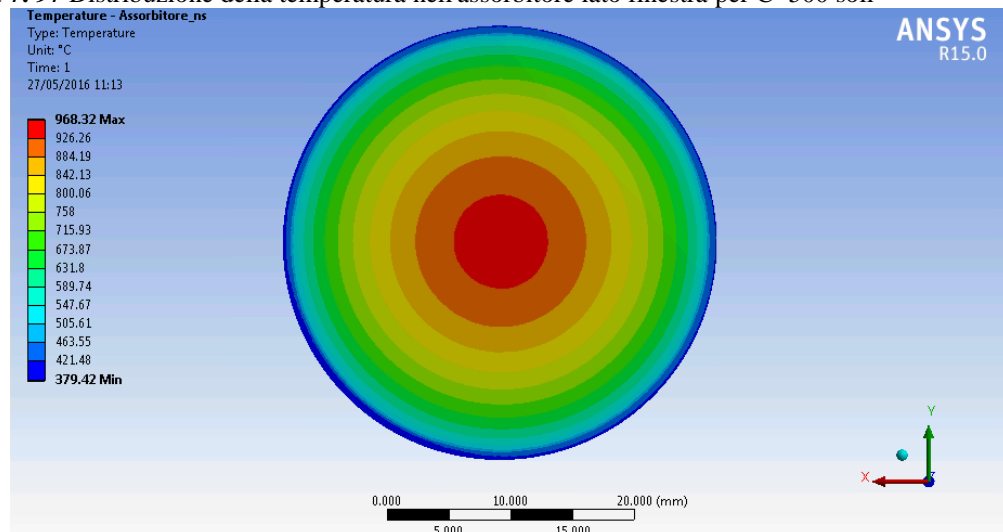
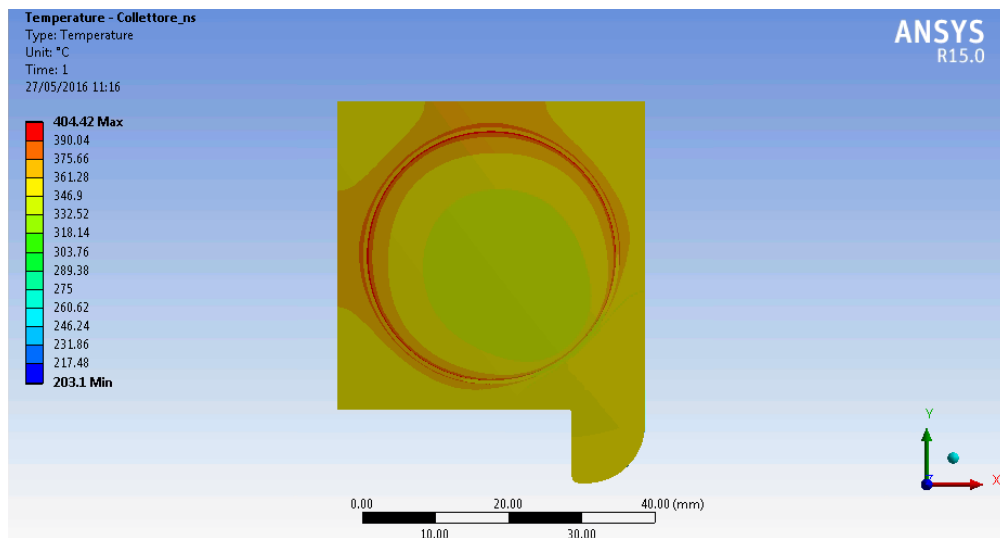


Figura 7. 98 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli

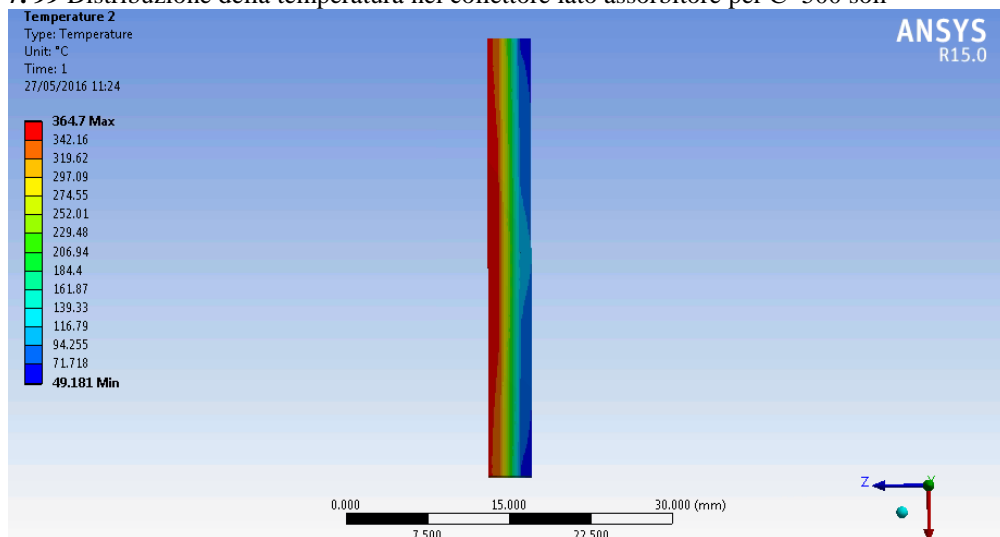
In Figura 7. 97 e Figura 7. 98, si ritrova la distribuzione di temperatura ottenuta nel caso con  $C = 500$  soli. Anche in questo caso l'assorbitore dissipa calore più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera Figura 7. 97 e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello Figura 7. 98.

Nel collettore, Figura 7. 99, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Si ritrova la zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura quasi omogenea e pari a  $362\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .



**Figura 7. 99** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=500$  soli



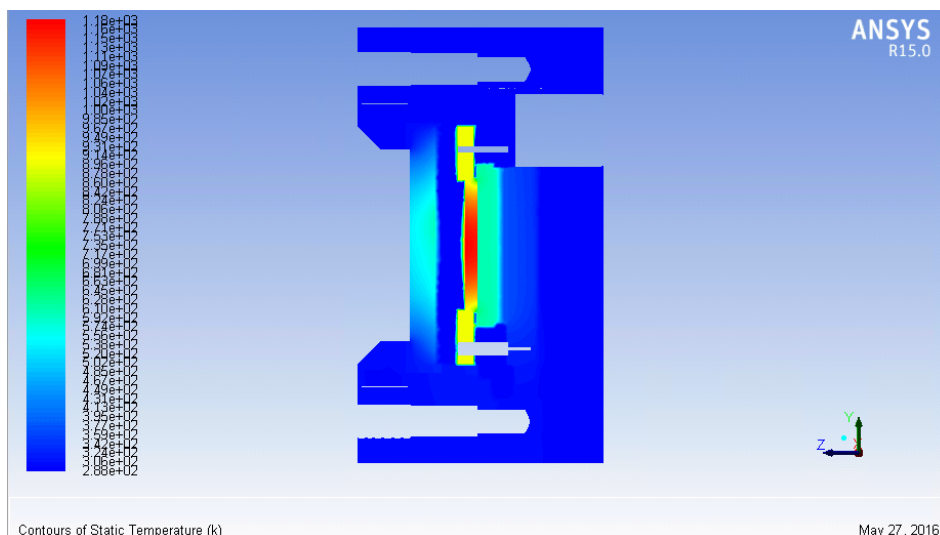
**Figura 7. 100** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=500$  soli

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tale componente raggiunge una temperatura massima più elevata rispetto al caso con anello da  $100\text{ }\mu\text{m}$  e la motivazione è la medesima del collettore Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sulla lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a  $101\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

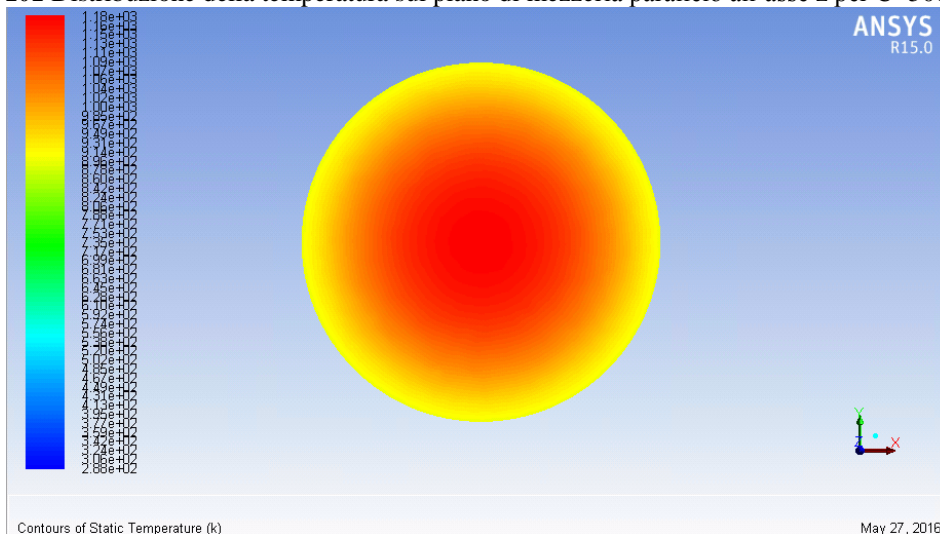
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con  $C=300$  soli, Figura 7. 82 e Figura 7. 83, ma in un range di temperatura compreso tra  $385,65\text{ }^{\circ}\text{C}$  e

15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno ed è inferiore a quella raggiunta nel caso con anello da 100  $\mu\text{m}$ . Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 290 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



**Figura 7. 101** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli



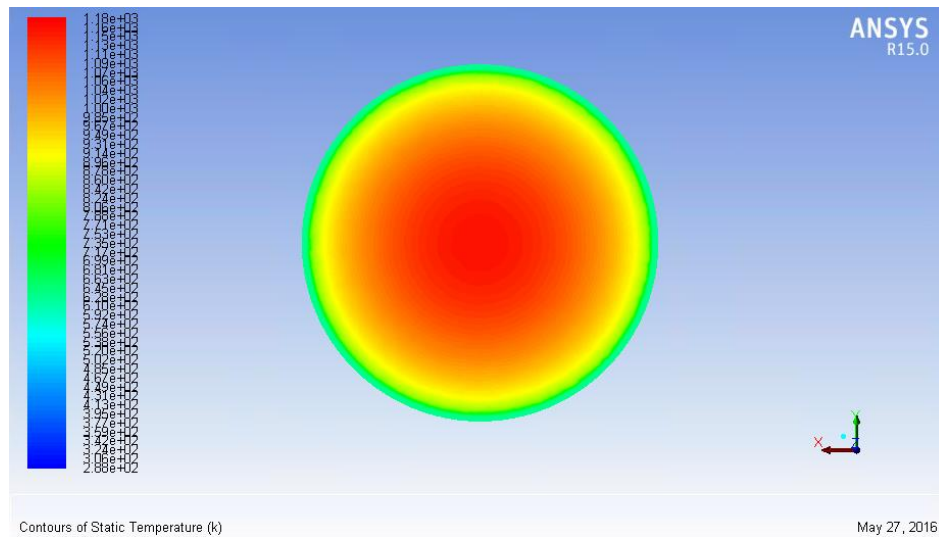
**Figura 7. 102** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=500 soli

In Figura 7. 101 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

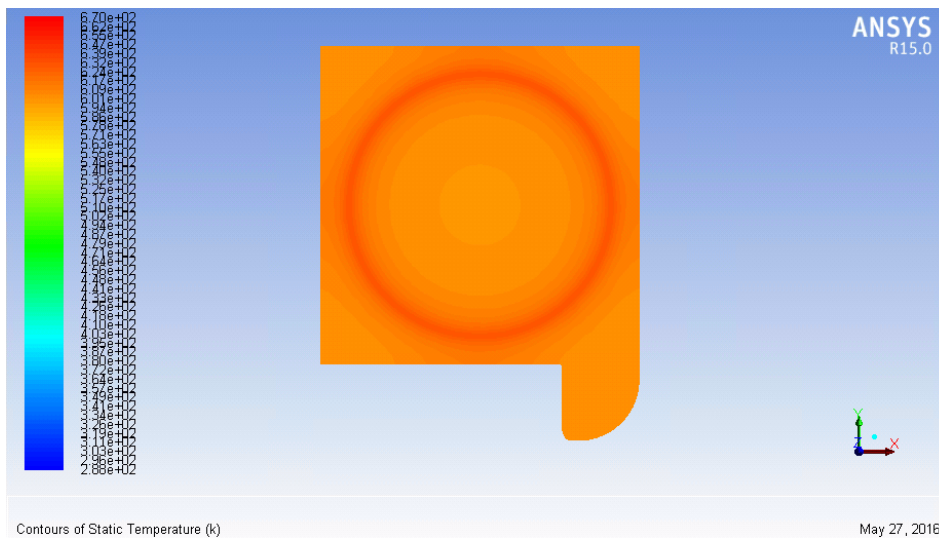
L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 101 e Figura 7. 102, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 907 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 387 °C.

Il collettore, Figura 7. 103, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 366 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 336 °C.

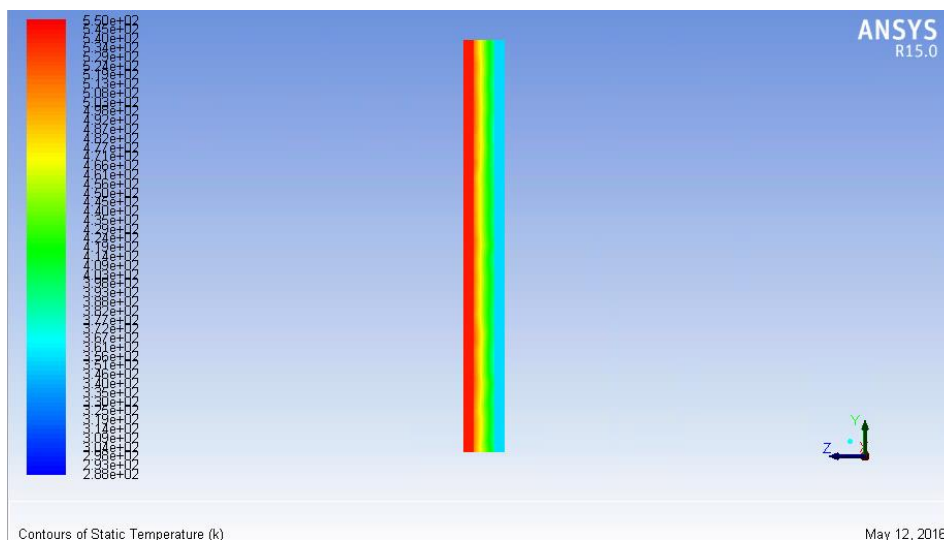
In Figura 7. 105 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 321 °C mentre il lato freddo 97,2 °C.



**Figura 7. 103** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli



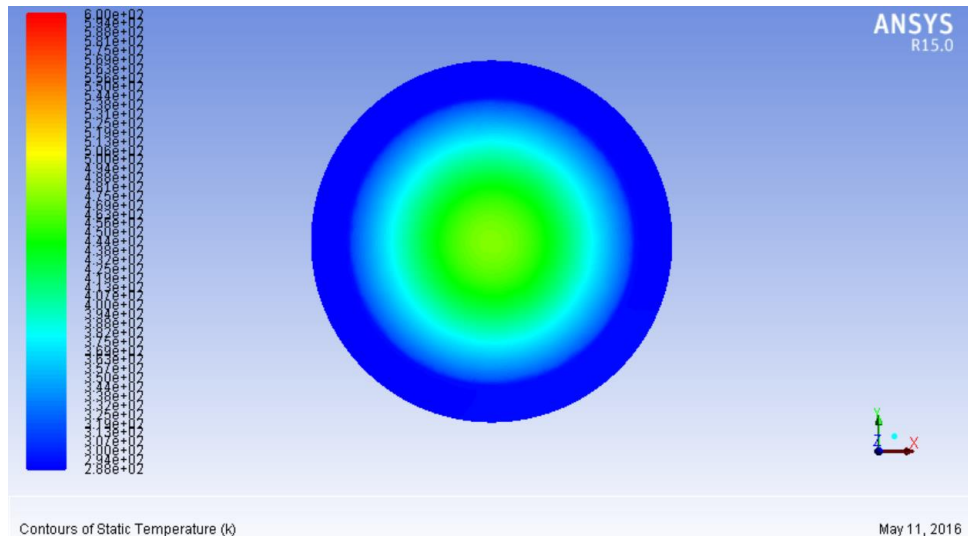
**Figura 7. 104** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli



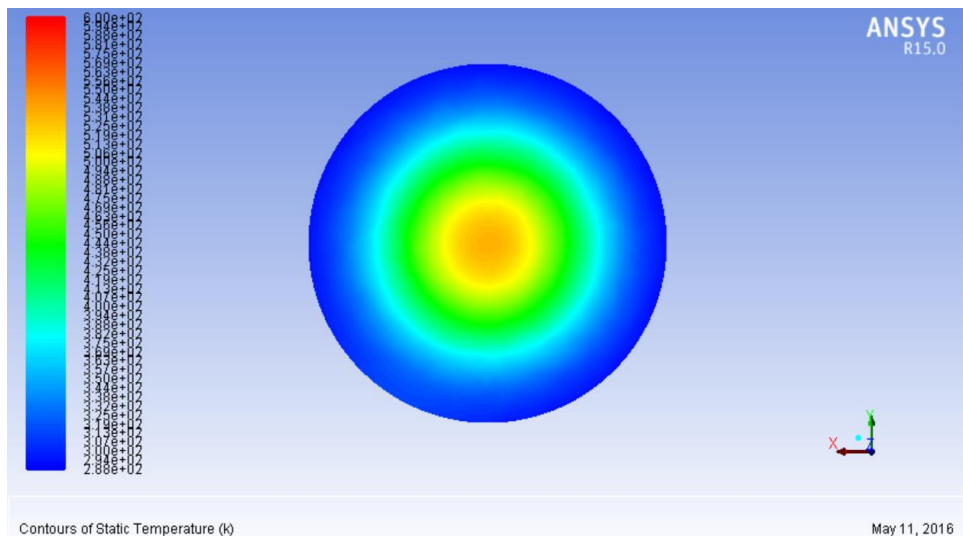
**Figura 7. 105** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli



La temperatura nella finestra, Figura 7. 106 e Figura 7. 107 ,rispetta l’andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 379 °C contro i 385 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell’assorbitore e alla presenza dell’acqua nel dissipatore.



**Figura 7. 106** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli



**Figura 7. 107** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell’assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell’assorbitore la potenza entrante è pari a 408 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 35,77 W, di cui 3,4 W sono scambiati nella cavità delimitata dall’anello distanziatore e della restante potenza circa 31,7 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 26,7 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l’anello distanziatore è pari a 345,49 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 250,5 W di cui 235 W sono scambiati per conduzione e 3,15 W per irraggiamento e 12,35 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 47 W scambiati per conduzione con la

Flangia di supporto per la finestra , 0,32 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 203,13 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 203,13 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 10,16 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,58 W. la restante potenza, 192,5 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

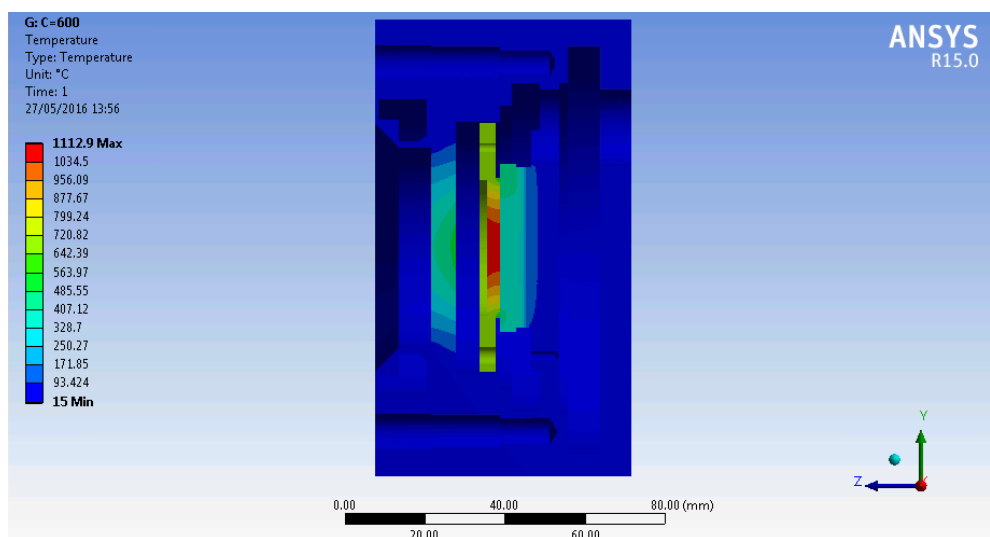
Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 32 W, di cui 15,1 W vengono scambiati con il dissipatore, 9,73 W per conduzione con la flangia e 7,2 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 600 soli.

In Figura 7. 108 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. Si fa sempre riferimento a Figura 7. 1. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1112,9 °C, tale valore, a differenza dei casi precedenti è leggermente superiore rispetto a quello ottenuto nel caso con anello distanziatore da 100 µm e la motivazione.

In Figura 7. 109 e Figura 7. 110 si ritrova la distribuzione di temperatura ottenuta nei casi precedenti. Anche in questo caso l'assorbitore dissipa calore principalmente per conduzione come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello.

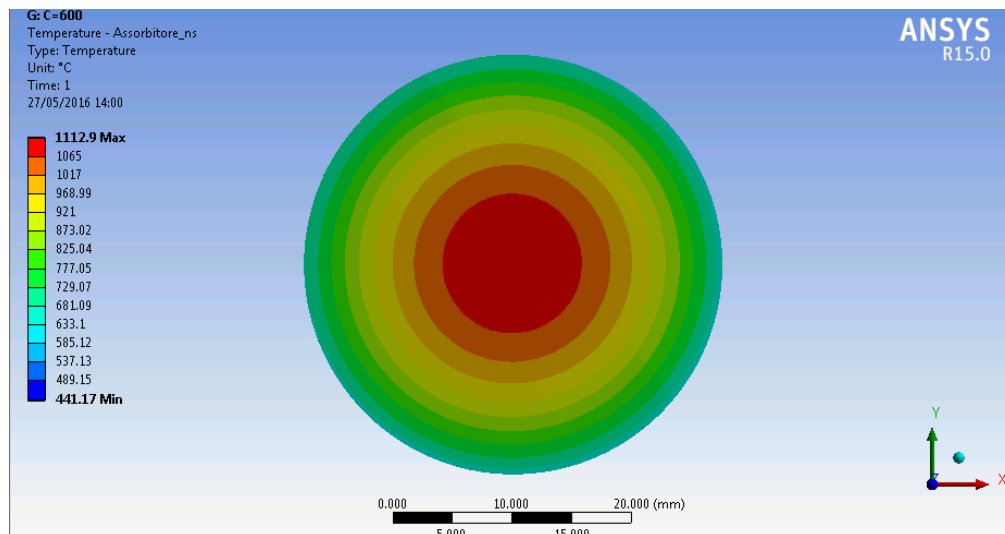
Nel collettore, Figura 7. 110, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Anche in questo caso i flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra . La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 398 °C.



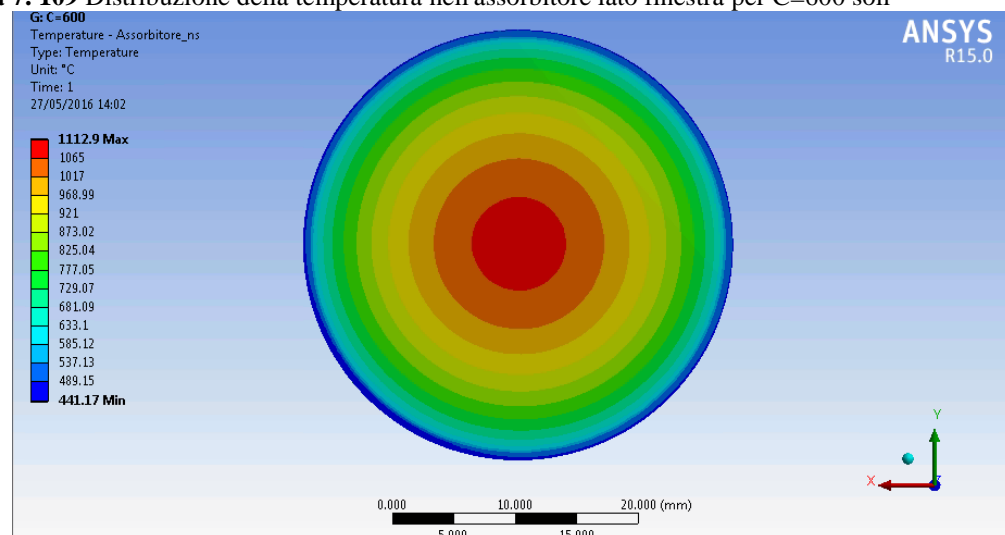
**Figura 7. 108** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli

In Figura 7. 112 può osservare l'andamento di temperatura nella sezione del modulo termoelettrico. Il lato caldo, che interfaccia con il collettore, si porta ad una temperatura all'incirca omogenea e pari 392°C, mentre il lato freddo si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 106°C.

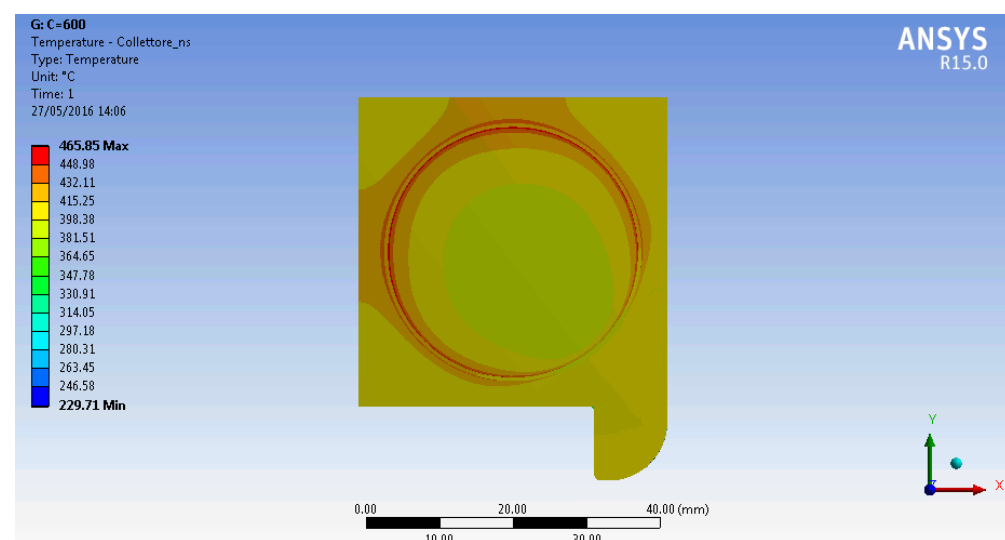




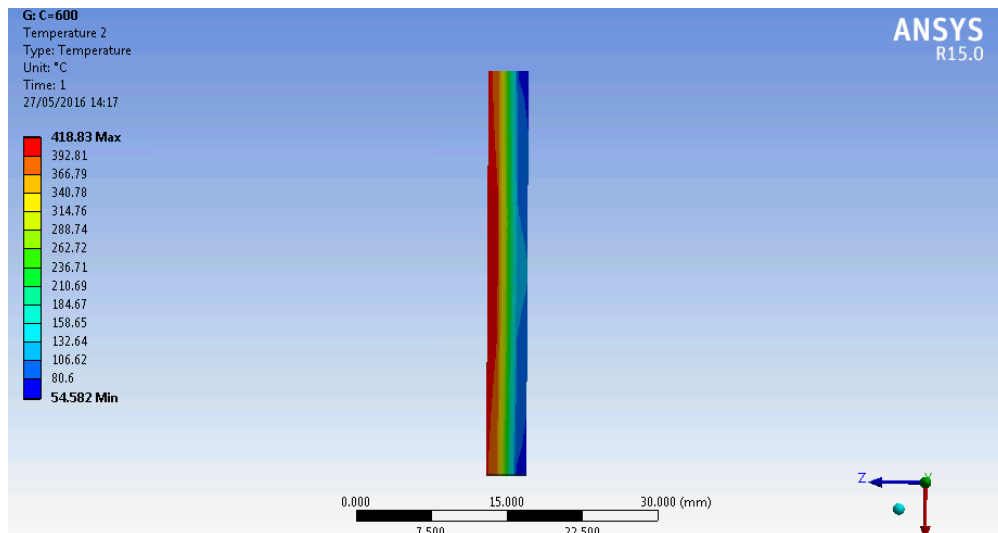
**Figura 7. 109** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli



**Figura 7. 110** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli



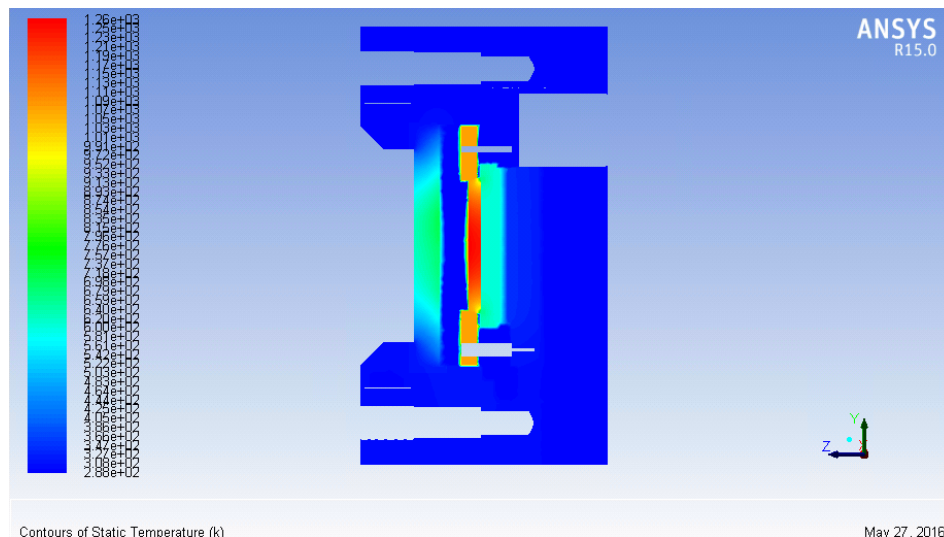
**Figura 7. 111** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli



**Figura 7. 112** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 82 e Figura 7. 83, ma in un range di temperatura compreso tra 522,72 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno ed è inferiore a quella raggiunta nel caso con anello da 100 µm. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 385 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

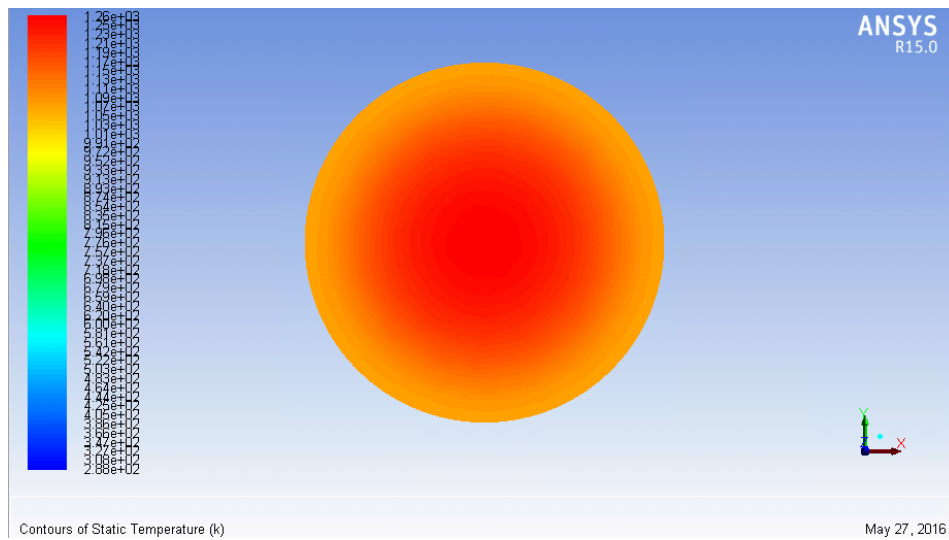
Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



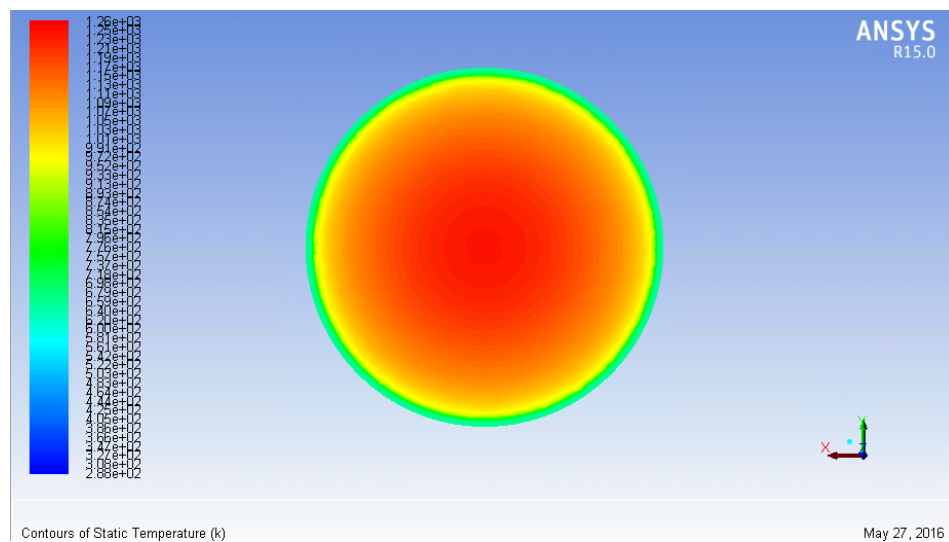
**Figura 7. 113** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli

In Figura 7. 113 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

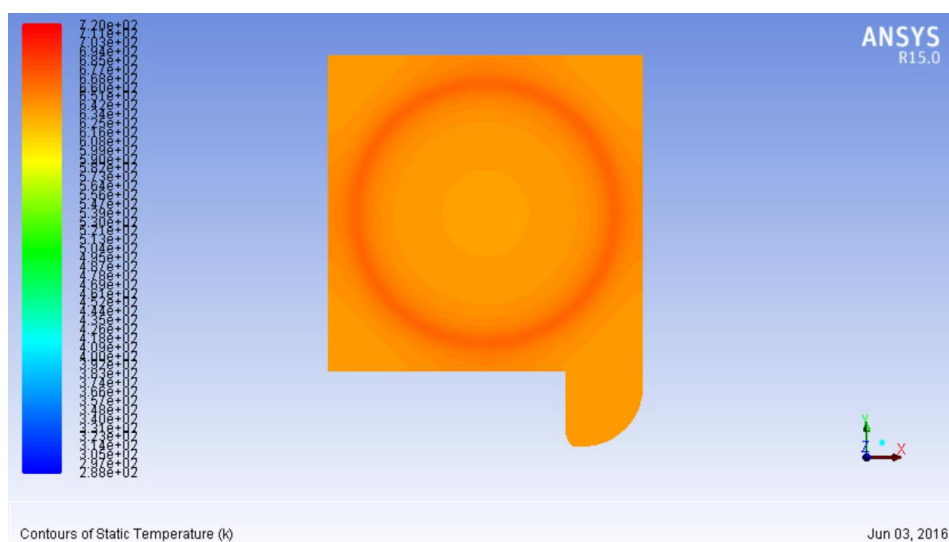
L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 114 e Figura 7. 115, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 990 °C, è inferiore. Questo è dovuto al fatto che su Steady State si trascurano i flussi elettronici e la produzione di potenza da parte del modulo termoeionico. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 396 °C.



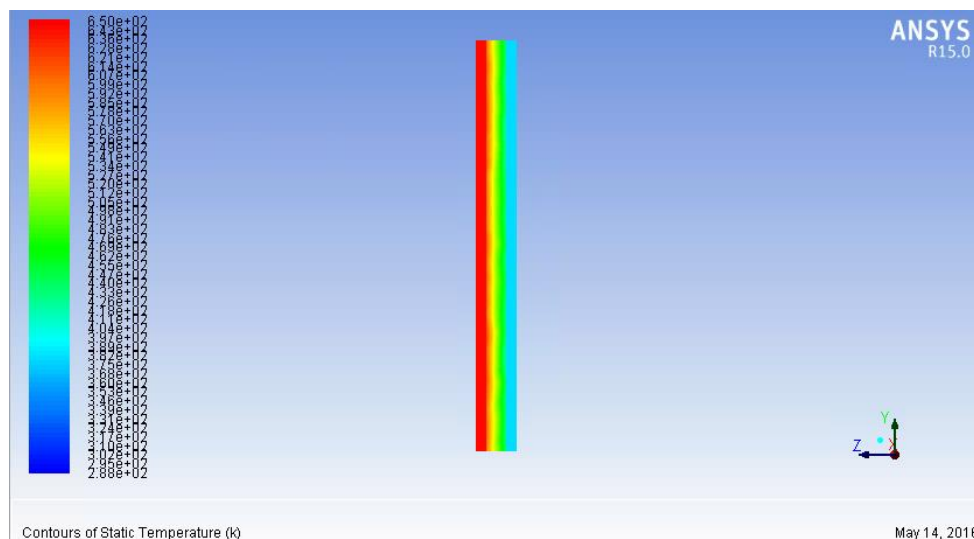
**Figura 7. 114** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=600$  soli



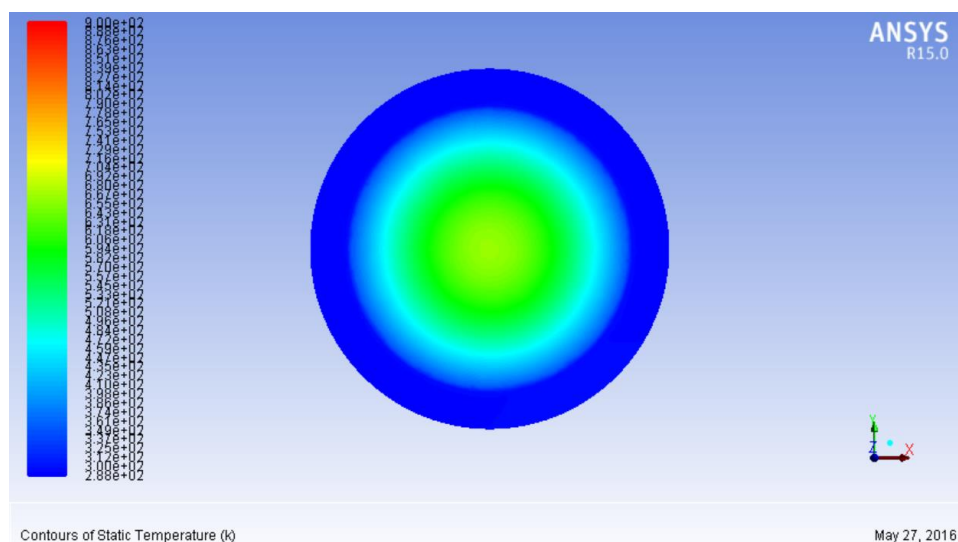
**Figura 7. 115** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=600$  soli



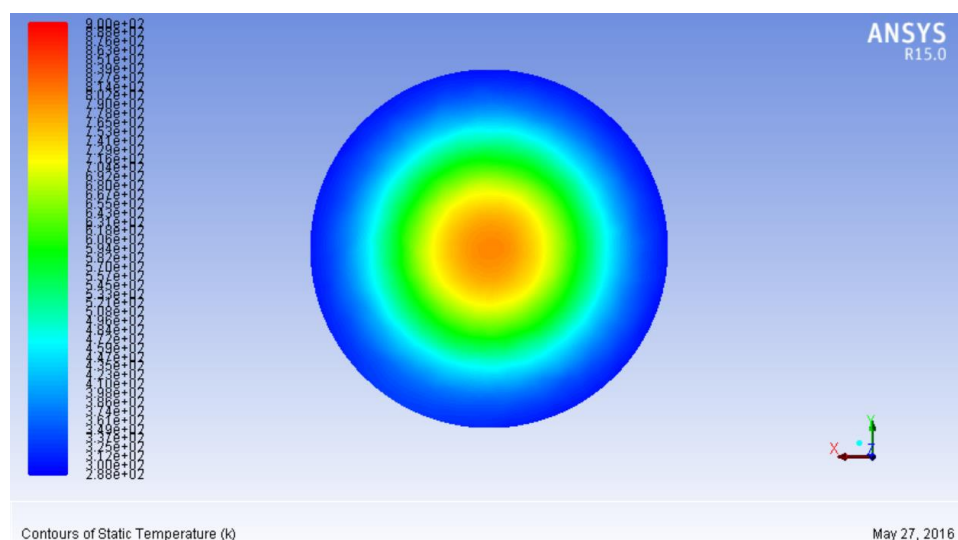
**Figura 7. 116** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=600$  soli



**Figura 7. 117** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli



**Figura 7. 118** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli



**Figura 7. 119** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli

Il collettore, Figura 7. 116, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 386 °C. Sul lato di interfaccia

con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 352 °C.

In Figura 7. 117 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 345 °C mentre il lato freddo 109 °C.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 118 e Figura 7. 119, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 480 °C.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 490 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 52,3 W, di cui 4,85 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 46,38 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 59 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 378,7W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 295 W di cui 262,3 W sono scambiati per conduzione e 4,71 W per irraggiamento e 28 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 58 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,65 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 236,35 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 236,35 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 11,8 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,58 W. la restante potenza, 223,9 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 61 W, di cui 29,25 W vengono scambiati con il dissipatore, 20,03 W per conduzione con la flangia e 11,71 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 700 soli.

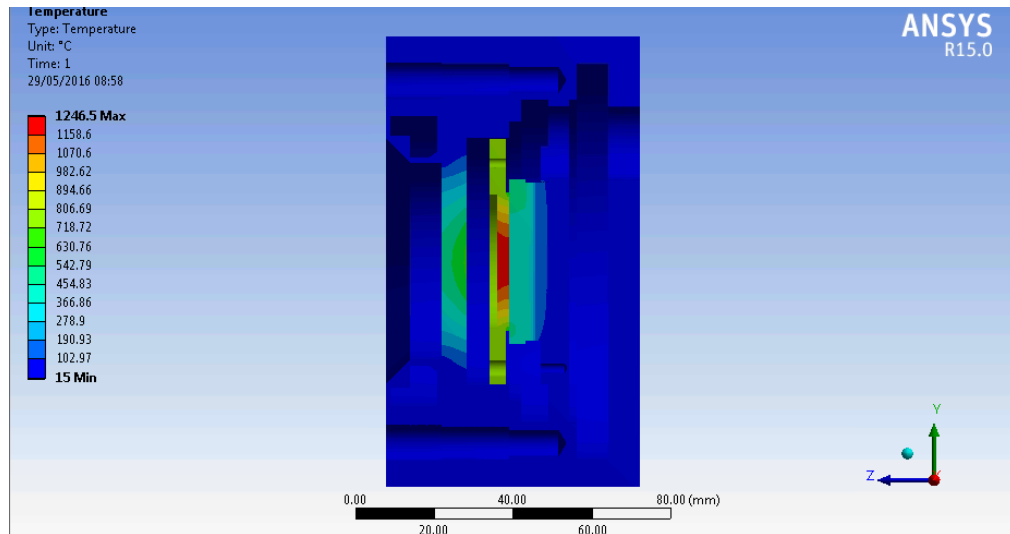
In Figura 7. 120 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1246,5 °C, tale valore, a differenza dei casi precedenti è leggermente superiore rispetto a quello ottenuto nel caso con anello distanziatore da 100µm.

In Figura 7. 121 e Figura 7. 122 si ritrova la distribuzione di temperatura ottenuta nei casi precedenti. Anche in questo caso l'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera e nella zona di contatto con il distanziatore ad anello.

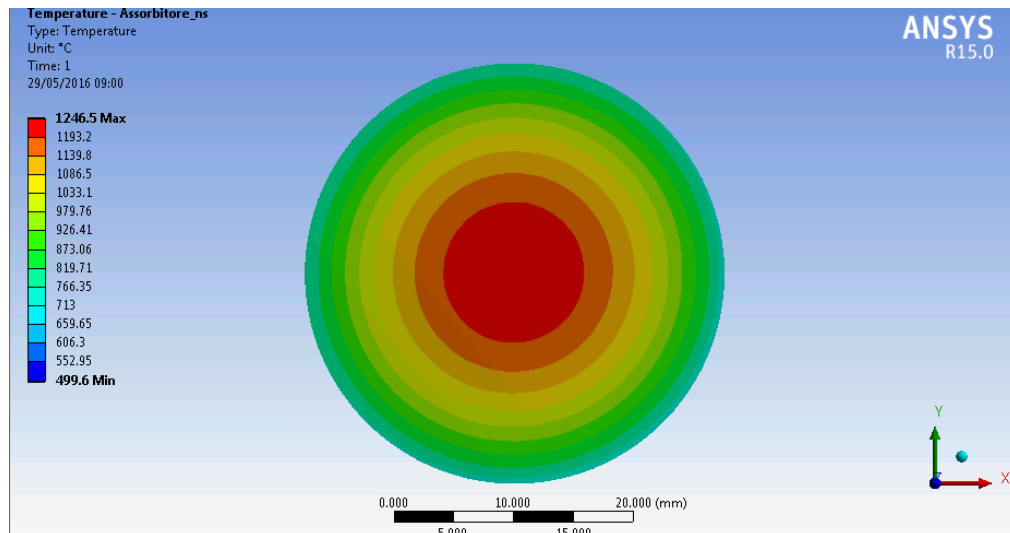
Nel collettore, Figura 7. 123, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Anche in questo caso i flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 462°C.

In Figura 7. 124 si può osservare l'andamento di temperatura nella sezione del modulo termoelettrico. Il lato caldo, che interfaccia con il collettore, si porta ad una temperatura

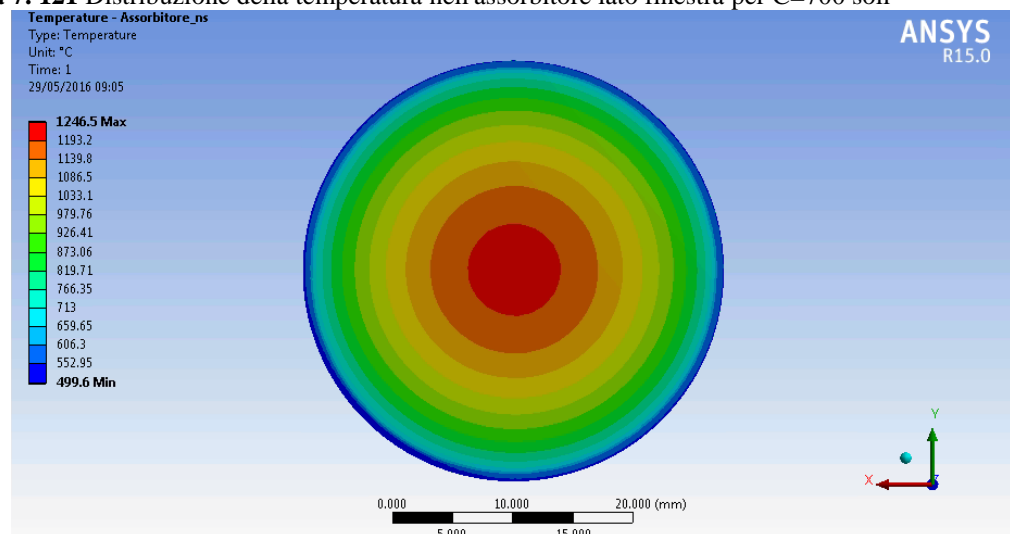
all'incirca omogenea e pari 450 °C, mentre il lato freddo si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 110°C.



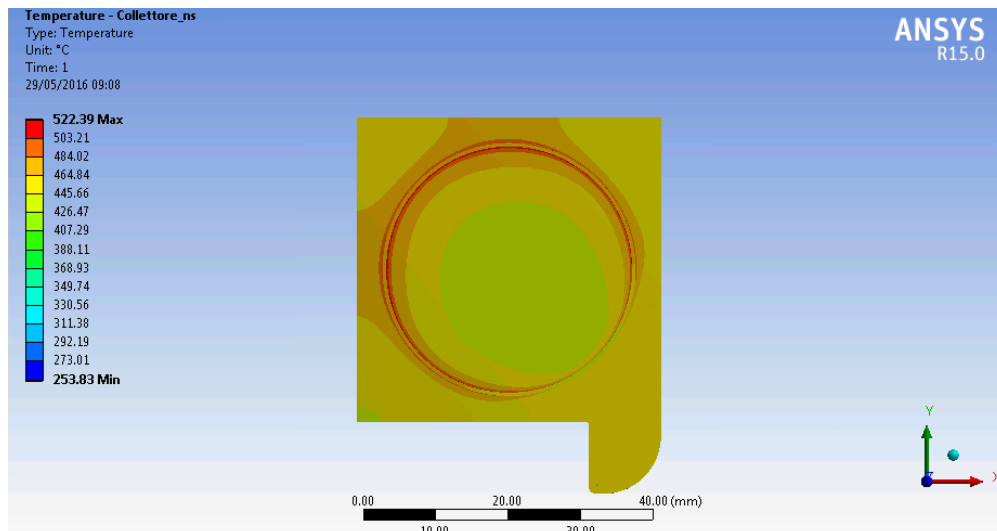
**Figura 7. 120** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli



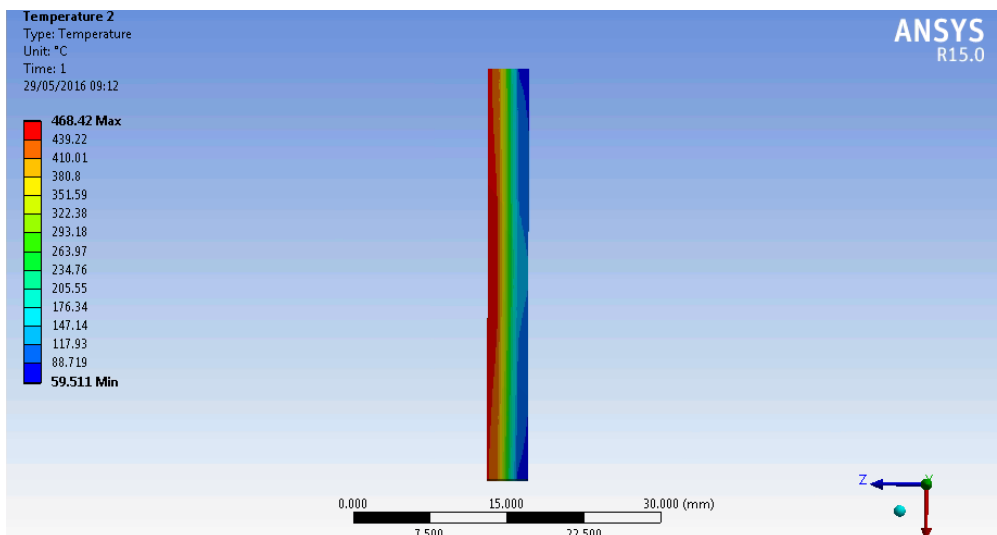
**Figura 7. 121** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli



**Figura 7. 122** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli



**Figura 7. 123** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli



**Figura 7. 124** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli

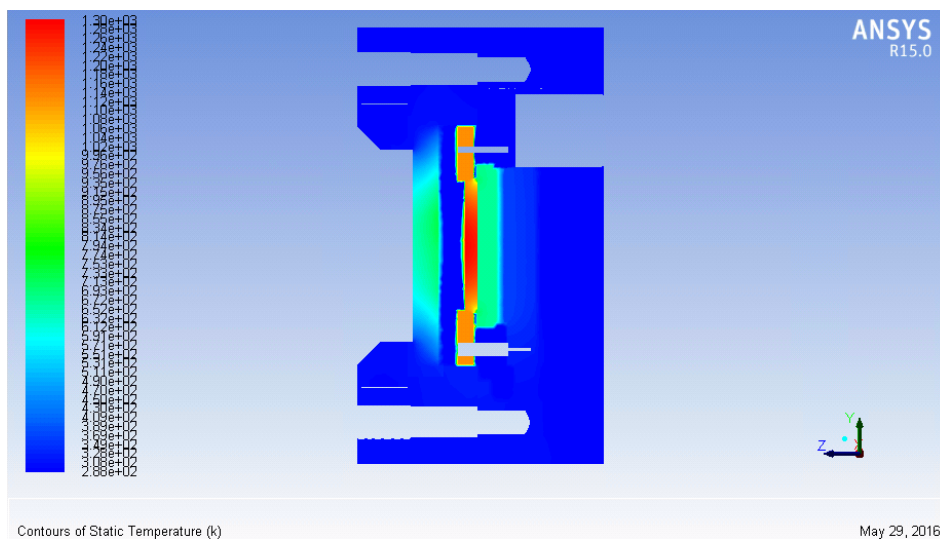
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 82 e Figura 7. 83, ma in un range di temperatura compreso tra 656,38°C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno ed è inferiore a quella raggiunta nel caso con anello da 100 µm. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 485 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

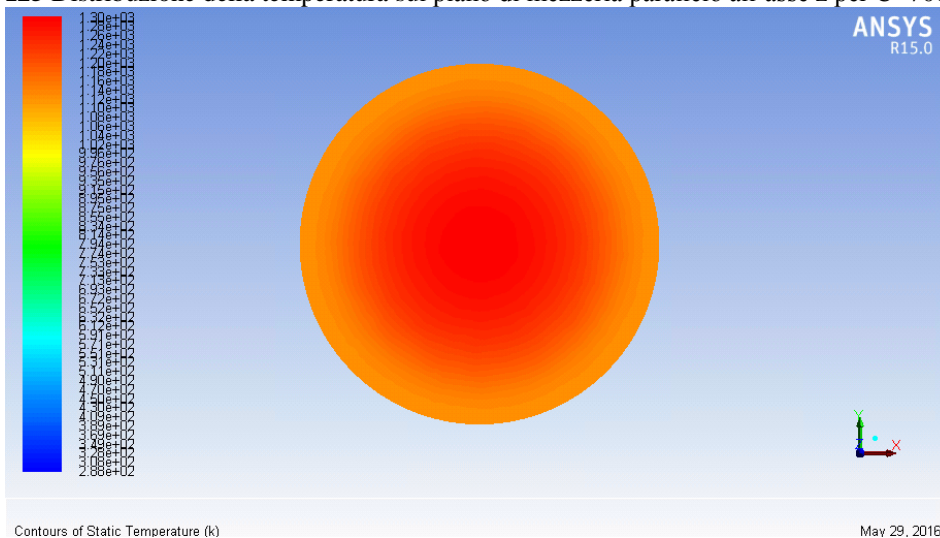
In Figura 7. 125 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 126 e Figura 7. 127, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 1025 °C, è inferiore. Questo è dovuto al fatto che su Steady State si trascurano i flussi elettronici e la produzione di potenza da parte del modulo termoeionico. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 440 °C.

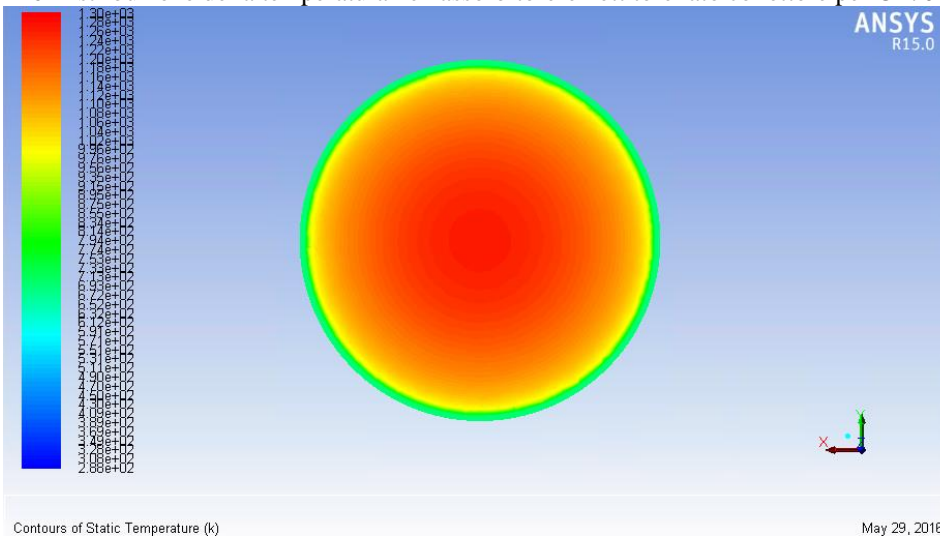




**Figura 7. 125** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per  $C=700$  soli

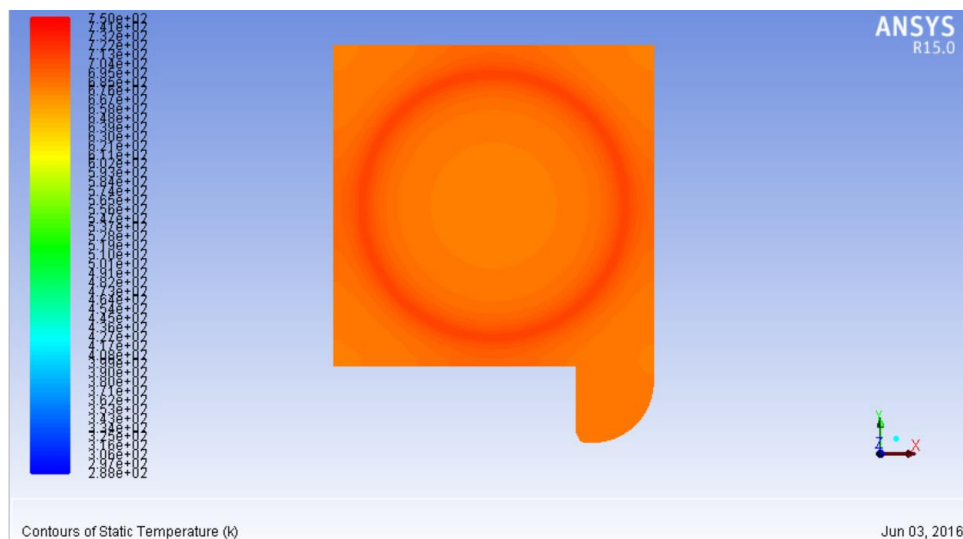


**Figura 7. 126** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=700$  soli

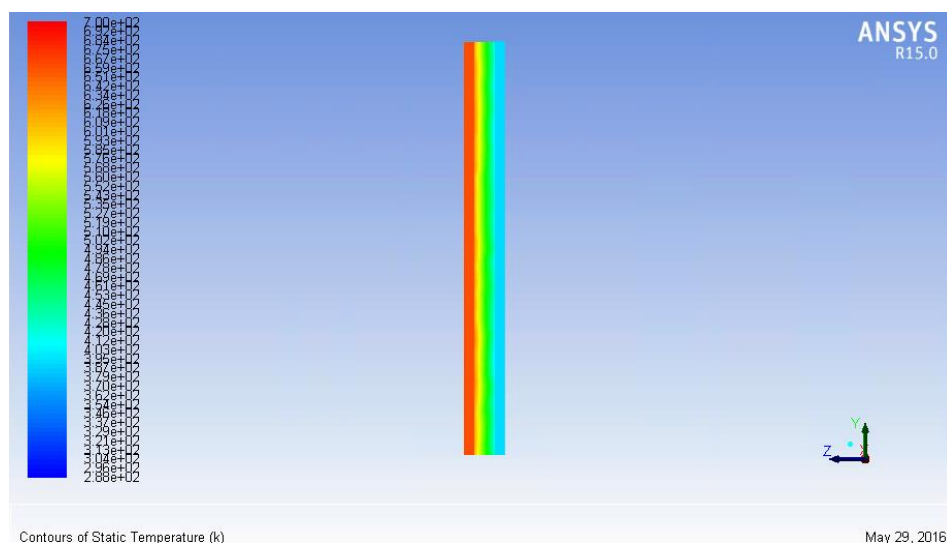


**Figura 7. 127** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=700$  soli

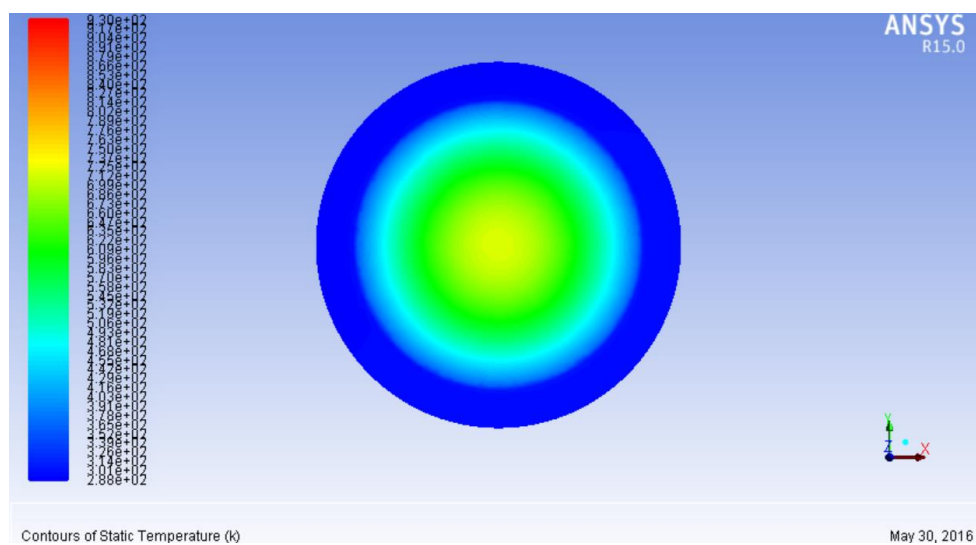




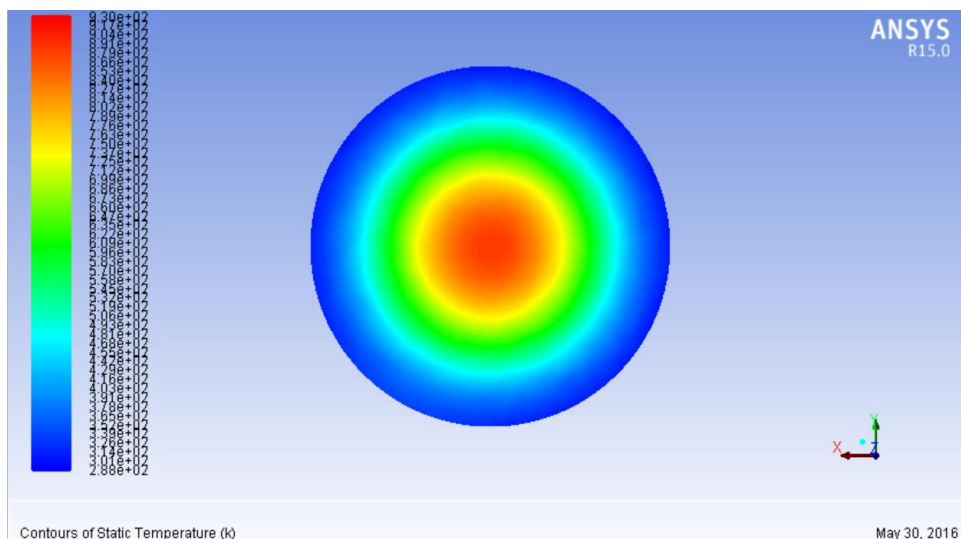
**Figura 7. 128** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=700$  soli



**Figura 7. 129** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=700$  soli



**Figura 7. 130** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per  $C=700$  soli



**Figura 7. 131** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per  $C=700$  soli

Il collettore, Figura 7. 128, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a  $421\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa  $402\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

In Figura 7. 129 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di  $393\text{ }^{\circ}\text{C}$  mentre il lato freddo  $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura nella finestra, Figura 7. 130 e Figura 7. 131, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa  $633\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a  $572\text{ W}$ . La potenza scambiata per irraggiamento è pari a  $61,6\text{ W}$ , di cui  $5,3\text{ W}$  sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa  $55\text{ W}$  vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoelettrico è pari a  $200\text{ W}$ , tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a  $310,41\text{ W}$ .

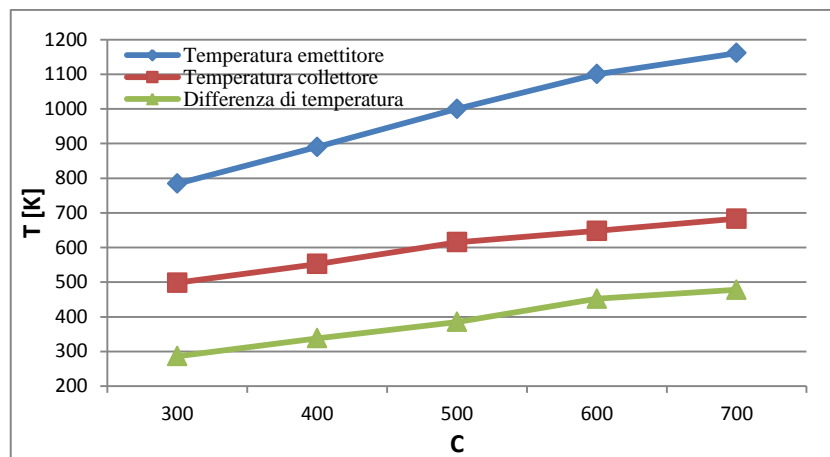
Nel collettore la potenza entrante è pari a  $298,21\text{ W}$  di cui  $191,06\text{ W}$  sono scambiati per conduzione e  $5,15\text{ W}$  per irraggiamento e  $102\text{ W}$  corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in  $65\text{ W}$  scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra,  $0,71\text{ W}$  scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti  $232,44\text{ W}$  sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a  $232,44\text{ W}$ . La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari  $12\text{ W}$ . La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a  $0,64\text{ W}$ . la restante potenza,  $219,76\text{ W}$ , è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

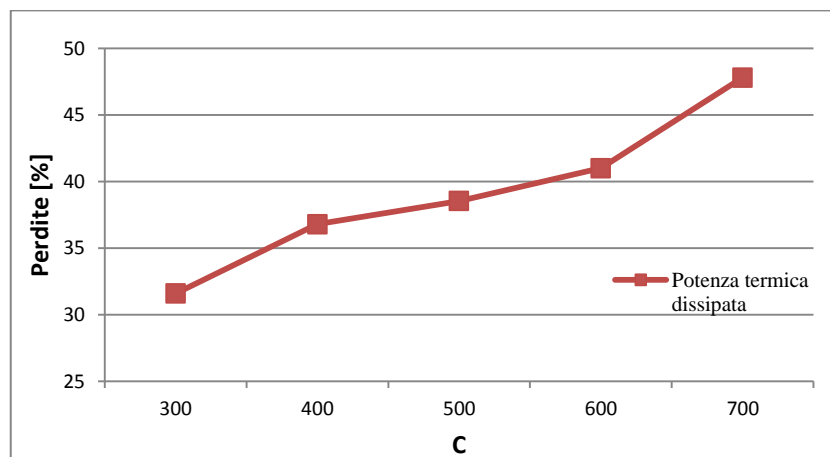
Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a  $58,21\text{ W}$ , di cui  $28,04\text{ W}$  vengono scambiati con il dissipatore,  $19,08\text{ W}$  per conduzione con la flangia e  $10,37$  per convezione con l'esterno.

In Figura 7. 132 si riportano gli andamenti della temperatura media delle superfici attive degli elettrodi. Come si può notare la differenza di temperatura aumenta all'aumentare della potenza entrante poiché cresce la percentuale di potenza termica che l'emettitore disperde con finestra, ghiera di sostegno, Flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia, Figura 7. 133. Quindi all'aumentare di tale valore ho il duplice vantaggio di aumento della temperatura dell'emettitore e della differenza di temperatura tra emettitore e collettore.

In Figura 7. 134 si riportano gli andamenti della densità di corrente. Come si può notare l'andamento è esponenziale all'aumentare della radiazione entrante. Questo dipende dalla forte dipendenza di  $J$  dalla temperatura dell'emettitore e dalla differenza di temperatura tra i due elettrodi.



**Figura 7. 132** Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termoelettrico

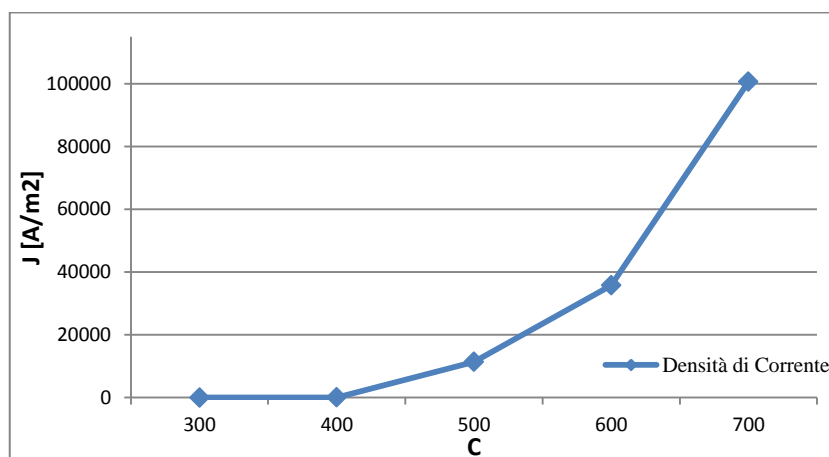


**Figura 7. 133** Andamento della percentuale di potenza termica scambiata dall'assorbitore con ghiera, finestra, Flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia

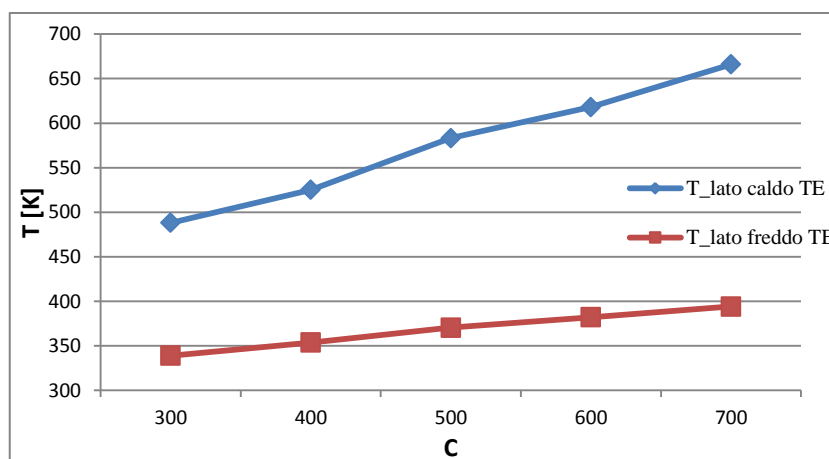
Dalla Figura 7. 136 è evidente come per i più bassi fattori di concentrazione della radiazione il modulo termoelettrico sia il principale componente di produzione. È inoltre evidente come non sia conveniente mantenersi a fattori di concentrazione inferiori a 500 soli.

In Figura 7. 135 si riportano le temperature medie del lato caldo e del lato freddo del modulo termoelettrico per i diversi fattori di concentrazione e la potenza prodotta dal modulo. Anche in questo caso le temperature aumentano all'aumentare della radiazione entrante poiché come si è visto dall'analisi delle potenze aumenta la potenza entrante nel

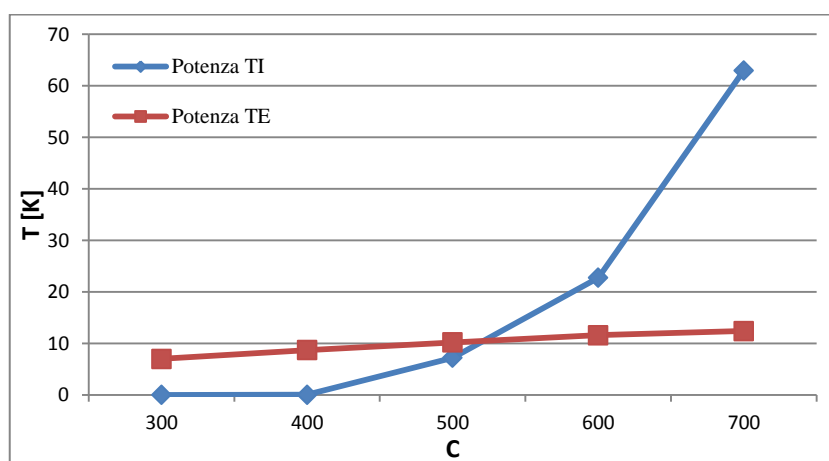
modulo e questo comporta anche un aumento della potenza prodotta dal modulo calcolata come il 5% della potenza entrante.



**Figura 7. 134** Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione



**Figura 7. 135** Andamento temperature nel modulo termoelettrico



**Figura 7. 136** Andamento della potenza prodotta dal modulo termoelettrico e termoelettrico al variare del fattore di concentrazione della radiazione

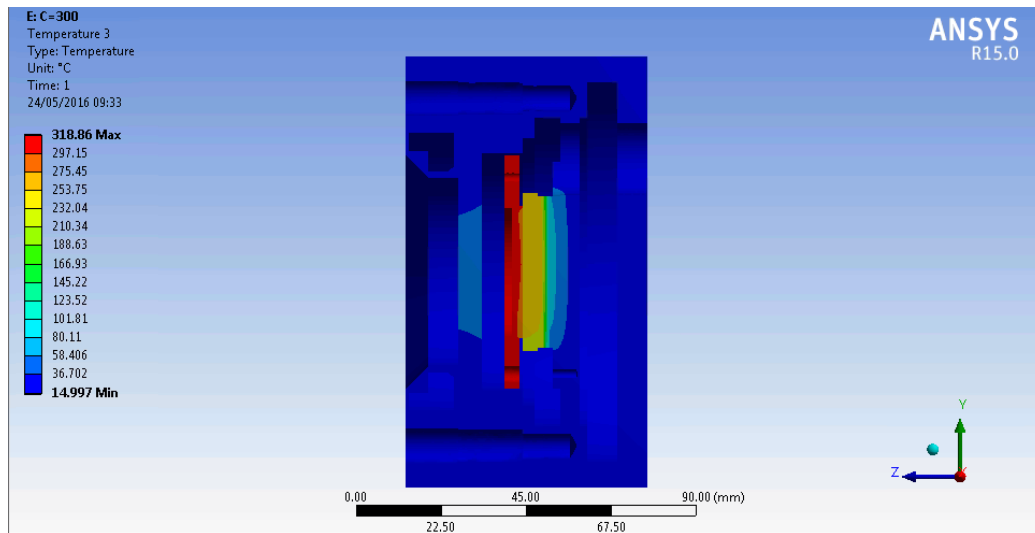
### 7.3 Maschera da 10 $\mu\text{m}$

L'area di contatto tra i distanziatori e gli elettrodi è la medesima dei casi precedenti. Ciò che ci si aspettava dal punto di vista termico era un comportamento vicino a quello del caso con distanziatore ad anello con spessore da 10  $\mu\text{m}$ . Dalle simulazioni invece si ottiene

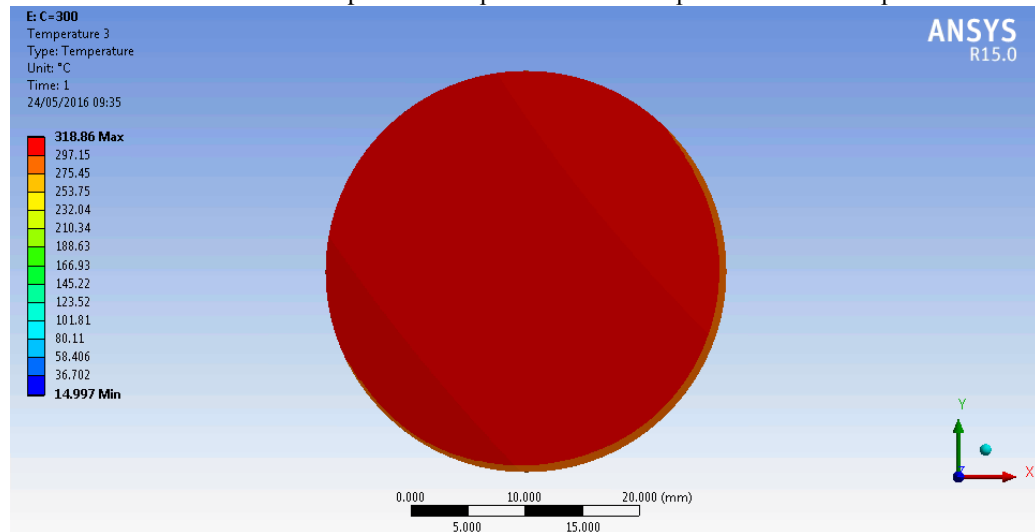
un comportamento totalmente diverso. A causa delle temperature ottenute all'assorbitore-emettitore e al collettore non è stato possibile applicare i flussi termici dovuti ai flussi elettronici e il modulo termoisolante si comporta come un dissipatore.

Di seguito si riportano le immagini relative alla distribuzione di temperatura ottenute con il programma Steady State e con Fluent e i flussi termici ricavati dall'analisi su Fluent per differenti fattori di concentrazione, 300, 400 soli, 500, 600 e 700 soli.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 300 soli.



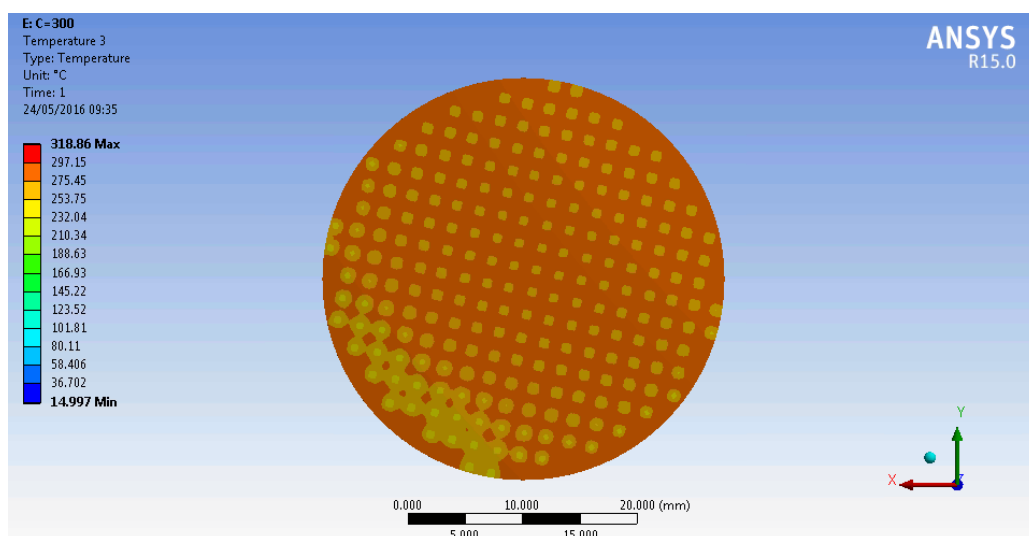
**Figura 7. 137** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli



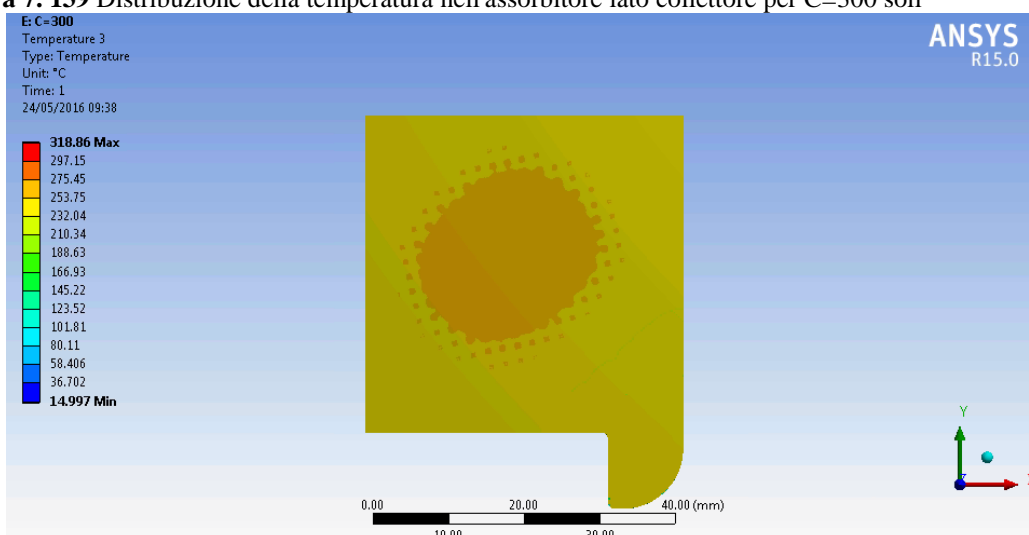
**Figura 7. 138** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli

In Figura 7. 137 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. I valori di temperatura sono riportati in °C. Per comprendere meglio Figura 7. 137 si fa sempre riferimento a Figura 7. 1. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 318,06 °C. Si può già notare come la temperatura della superficie interfacciante con il gap interelettrodo sia molto vicina a quella del collettore.

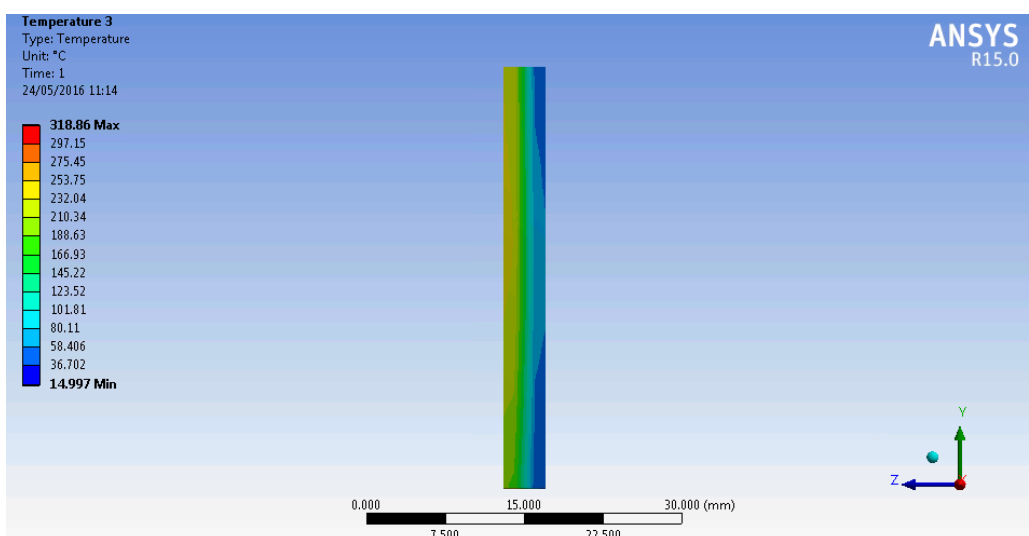
Come si può notare in Figura 7. 138 la temperatura si mantiene pressoché omogenea e questo sta ad indicare le maggiori dispersioni dovute ai distanziatori collocati sul lato opposto.



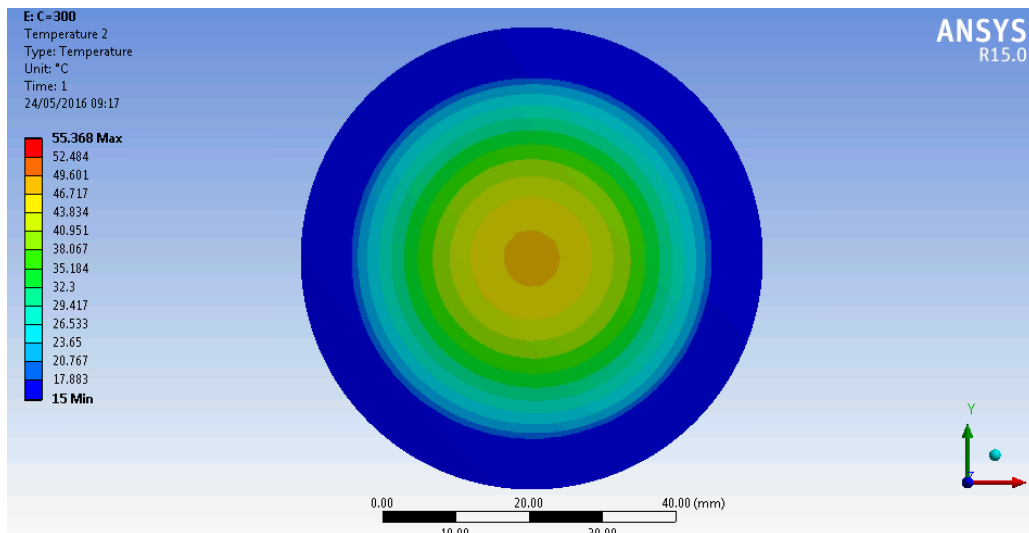
**Figura 7. 139** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli



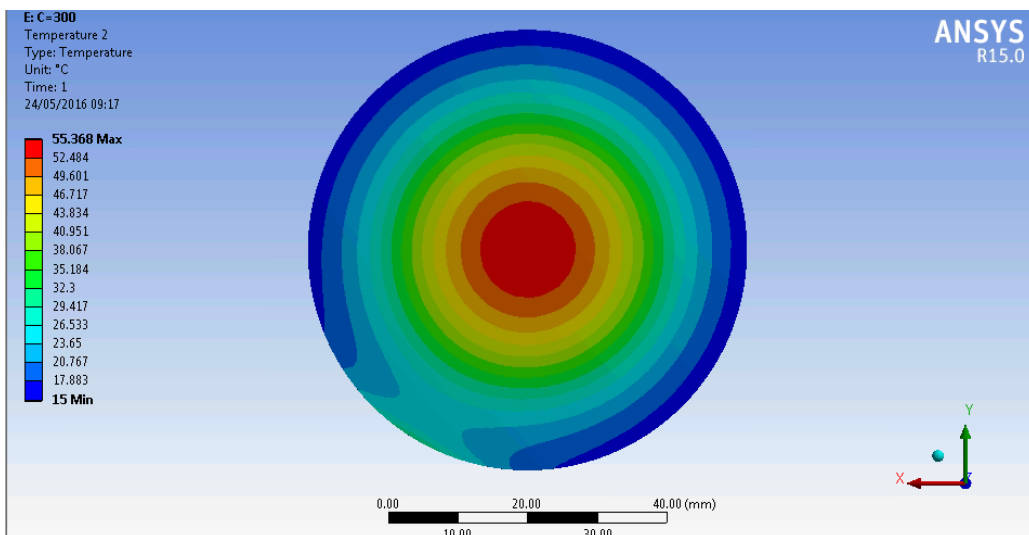
**Figura 7. 140** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli



**Figura 7. 141** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli



**Figura 7. 142** Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli



**Figura 7. 143** Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli

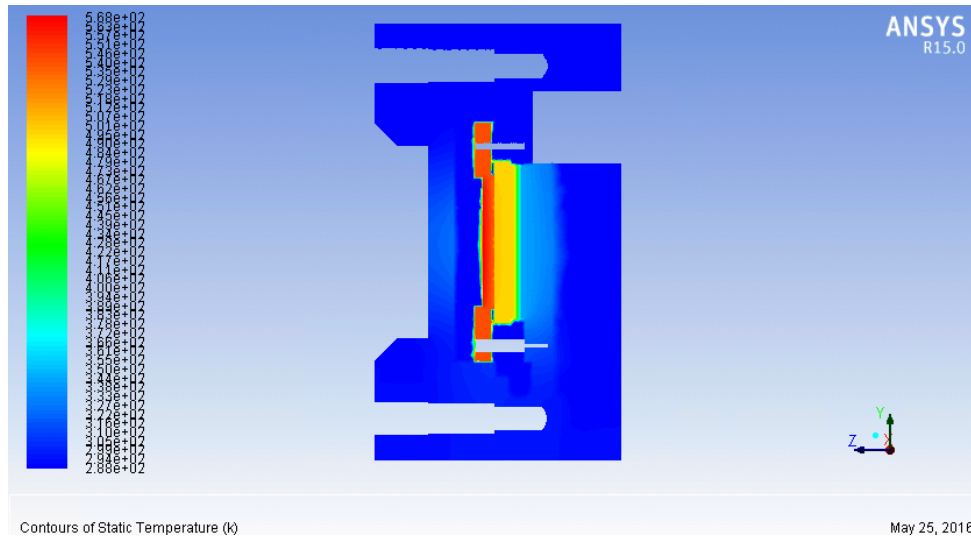
Nel collettore, Figura 7. 140, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia con i distanziatori. La temperatura del collettore sul lato interfacciante il gap interelettrodico differisce di circa cinquanta gradi da quella dell'assorbitore-emettitore. La superficie di interfaccia con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 247 °C.

Il lato caldo del modulo termoelettrico, Figura 7. 141, si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 235 °C, mentre il lato freddo pari a 55 °C.

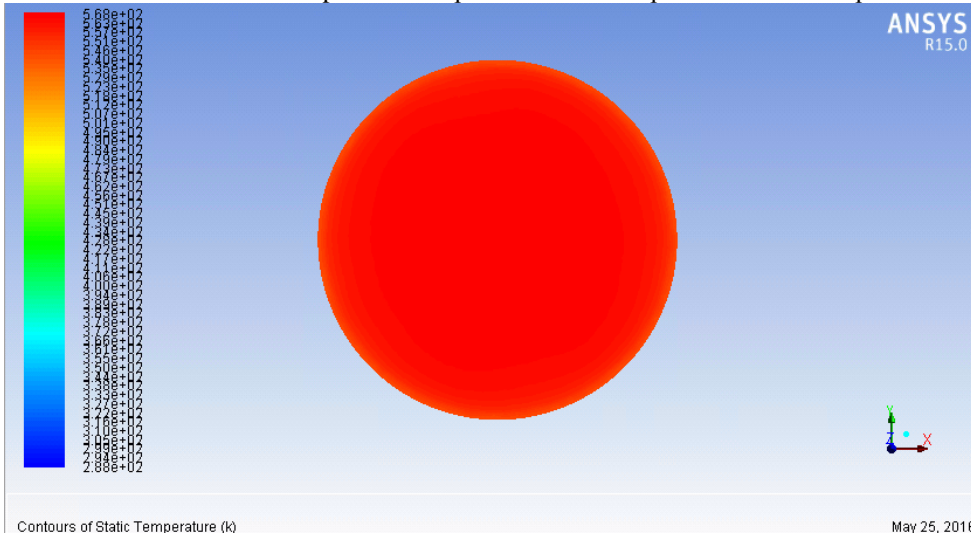
La finestra, Figura 7. 142 e Figura 7. 143 , raggiunge la massima temperatura, pari a 55,4 °C, sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massi raggiunta è circa 40 °C inferiore rispetto a quella raggiunta sull'altro lato, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo. Tali temperature sono molto inferiori rispetto a quelle raggiunte nei due casi precedenti e questo è dovuto alla più bassa temperatura raggiunta dall'assorbitore.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

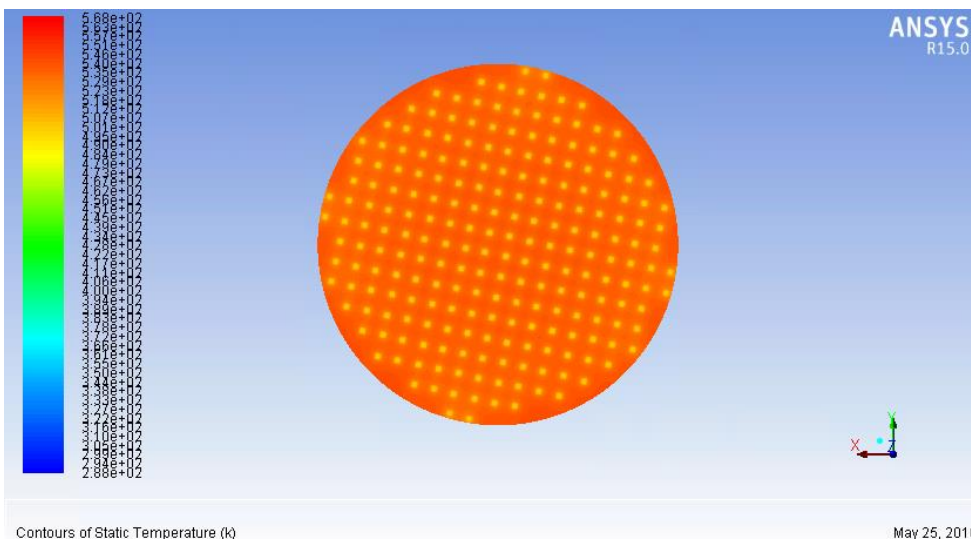
In Figura 7. 144 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.



**Figura 7. 144** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli



**Figura 7. 145** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli

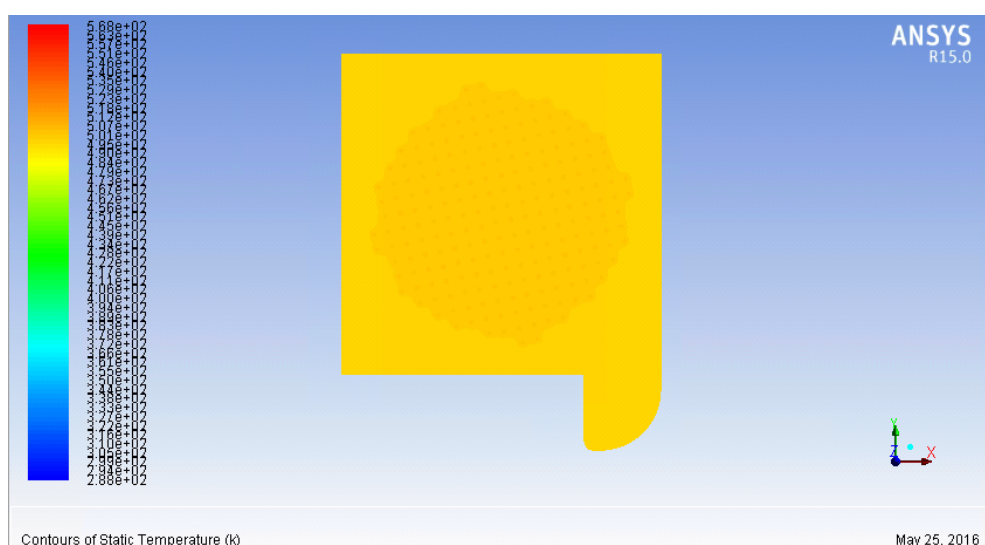


**Figura 7. 146** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli

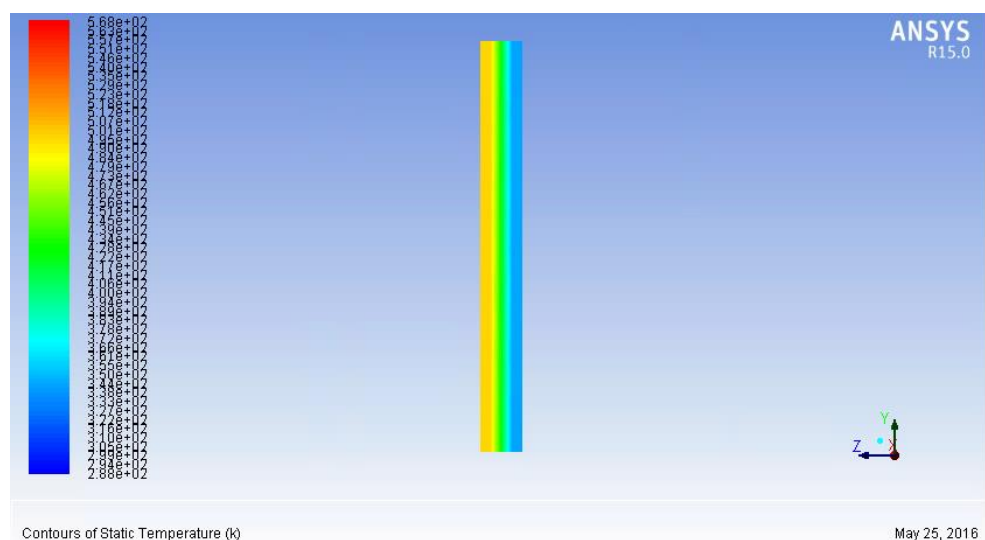


L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 145, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 295,1 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con i distanziatori ed è pari a 230 °C, Figura 7. 146.

Il collettore, Figura 7. 147, presenta una zona più calda nella zona di contatto con i distanziatori. La temperatura massima raggiunta è pari a 228 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State e questo è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui, non essendo presente acqua, si è imposta una temperatura di parete fissa. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 220 °C.



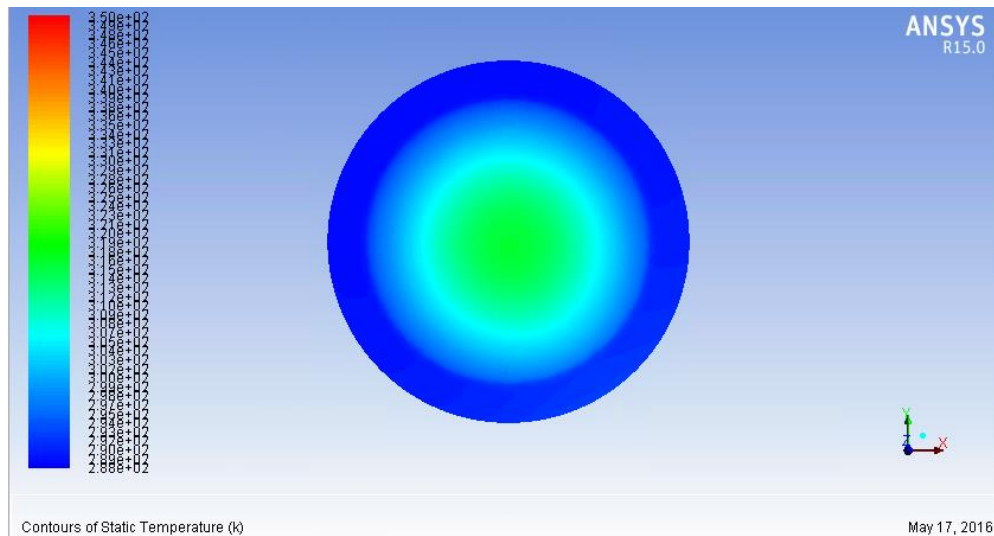
**Figura 7. 147** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli



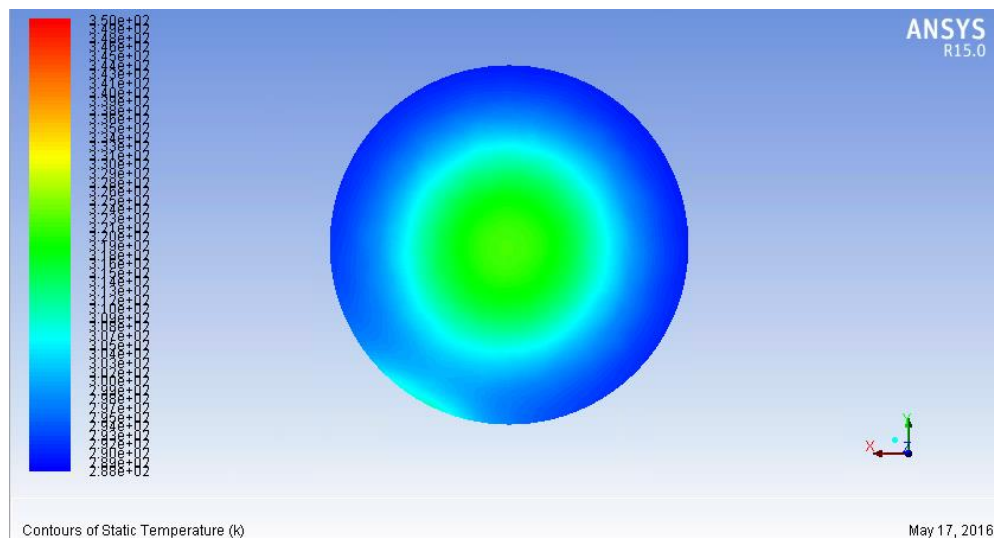
**Figura 7. 148** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli

In Figura 7. 148 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 217 °C mentre il lato freddo 70,85 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto a quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza termica uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 149 e Figura 7. 150,rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 50 °C contro i 55 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.



**Figura 7. 149** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli



**Figura 7. 150** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

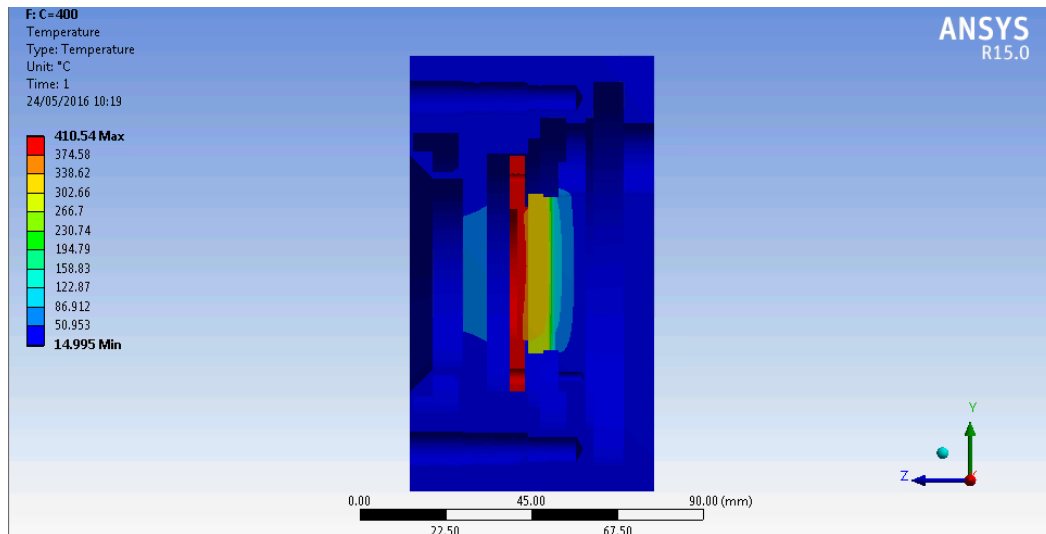
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 245 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 2,37 W, di cui 0,05 W sono scambiati nel gap interelettrodico e della restante potenza circa 2,3 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto e l'anello distanziatore è pari a 242,6 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 180,52 W di cui 180,51 W sono scambiati per conduzione e 0,049 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 28 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,26 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 152,25 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

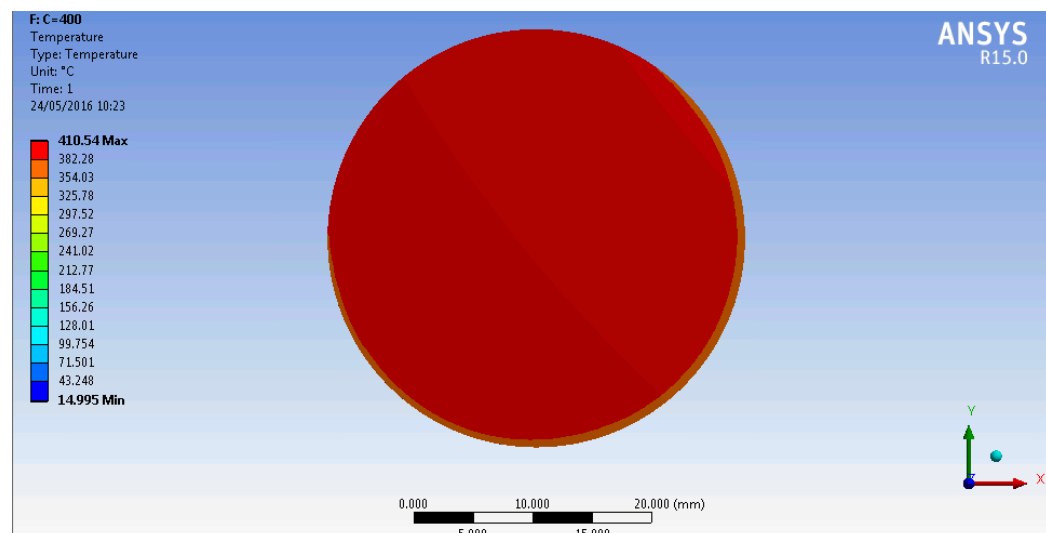
La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 152,25 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 7,6 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,34 W. la restante potenza, 144,3 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 2,67 W, di cui 2,14 W vengono scambiati con il dissipatore, 0,075 W per conduzione con la flangia e 0,45 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 400 soli.



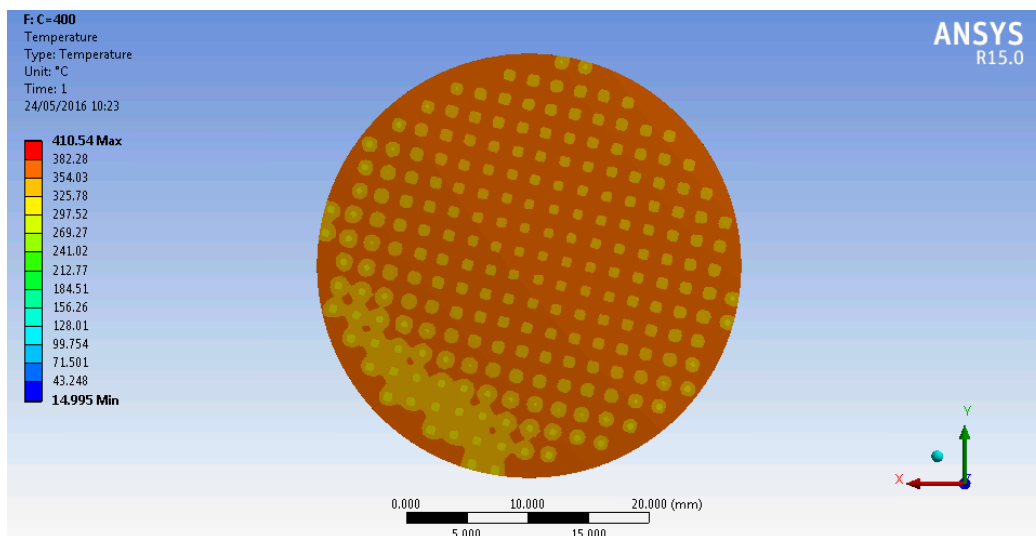
**Figura 7. 151** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli



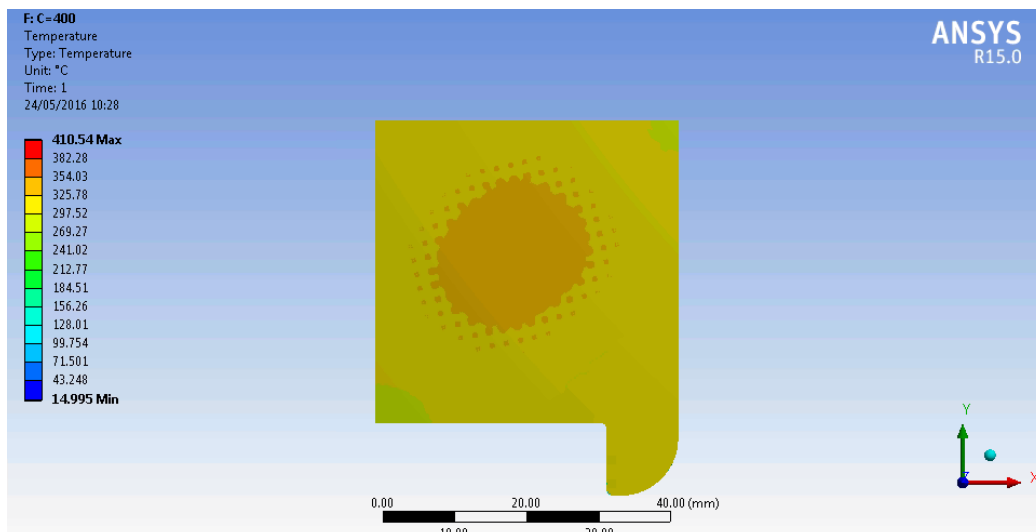
**Figura 7. 152** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli

In Figura 7. 151 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 410 °C.

Come si può notare in Figura 7. 152 la temperatura si mantiene pressoché omogenea e questo sta ad indicare le maggiori dispersioni dovute ai distanziatori collocati sul lato opposto (Figura 7. 153)



**Figura 7. 153** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli

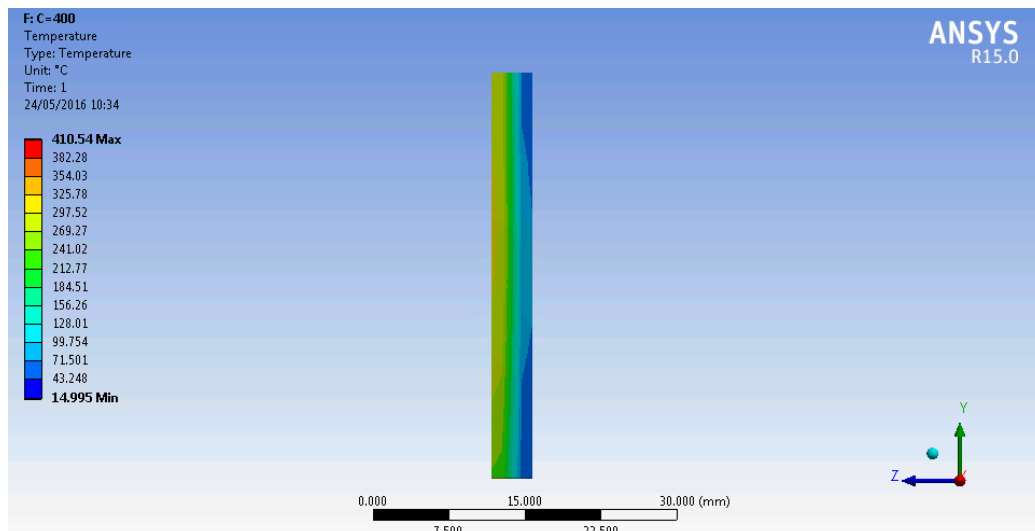


**Figura 7. 154** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli

Nel collettore (Figura 7. 154) si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia con i distanziatori. La temperatura del collettore sul lato interfacciante il gap interelettrodico differisce di circa cinquanta gradi da quella dell'assorbitore-emettitore. La superficie di contatto con il modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa costante e pari a 320°C.

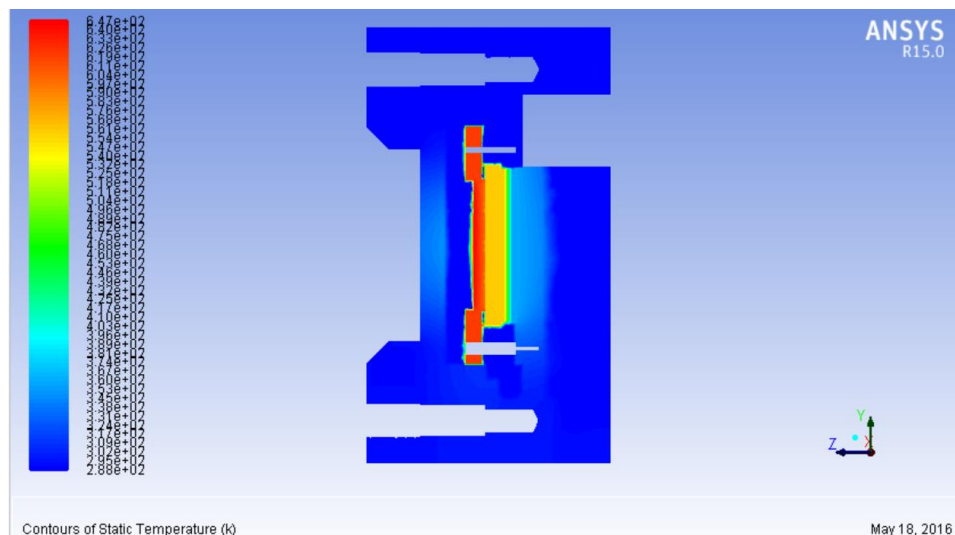
Il lato caldo del modulo termoelettrico (Figura 7. 155) si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 305 °C, mentre il lato freddo pari a 82 °C.

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli (Figura 7. 149 e Figura 7. 150) ma in un range di temperatura compreso tra 84,68 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 73 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo. Tali temperature sono molto inferiori rispetto a quelle raggiunte nei due casi (anello di stanziatore da 100 e 10µm) precedenti e questo è dovuto alla più bassa temperatura raggiunta dall'assorbitore.



**Figura 7. 155** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

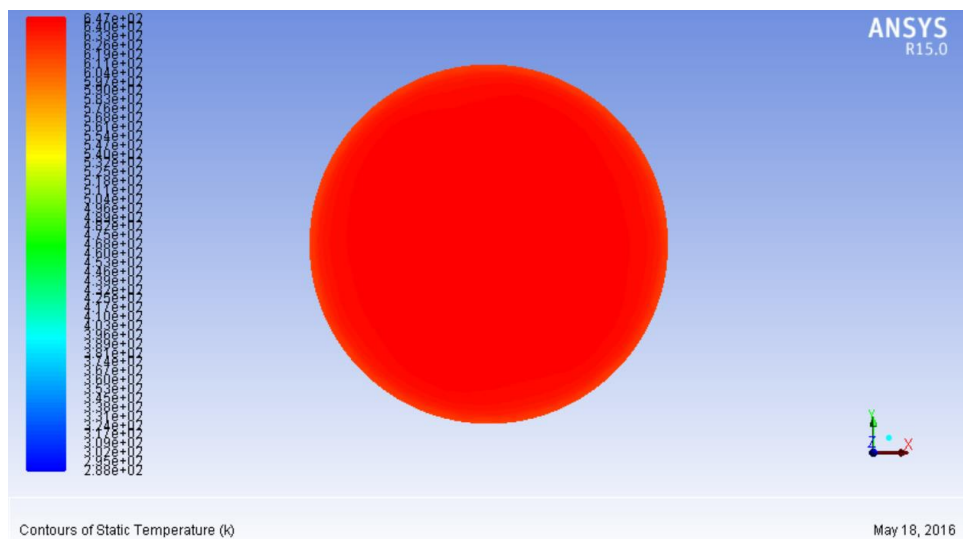


**Figura 7. 156** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli

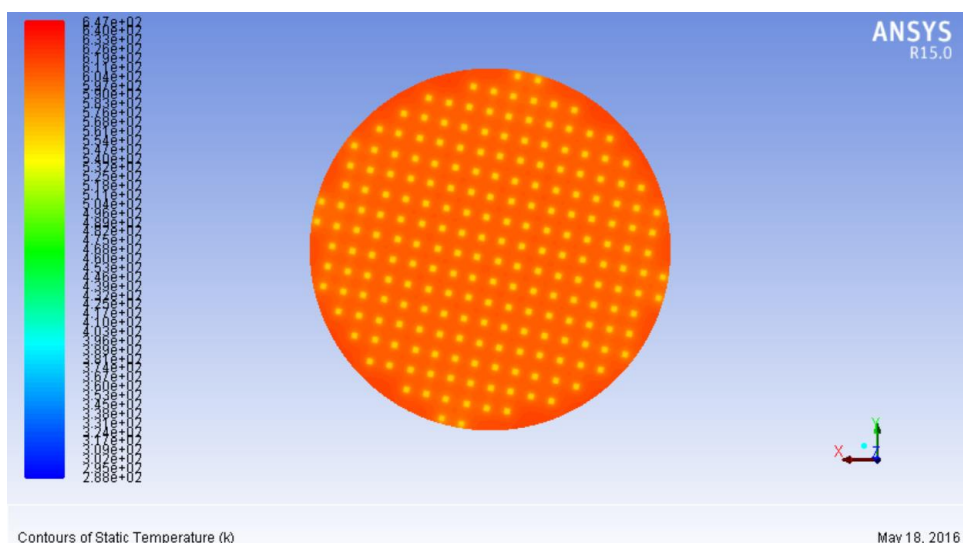
In Figura 7. 156 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 157 e Figura 7. 158, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 374 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con i distanziatori ed è pari a 300 °C.

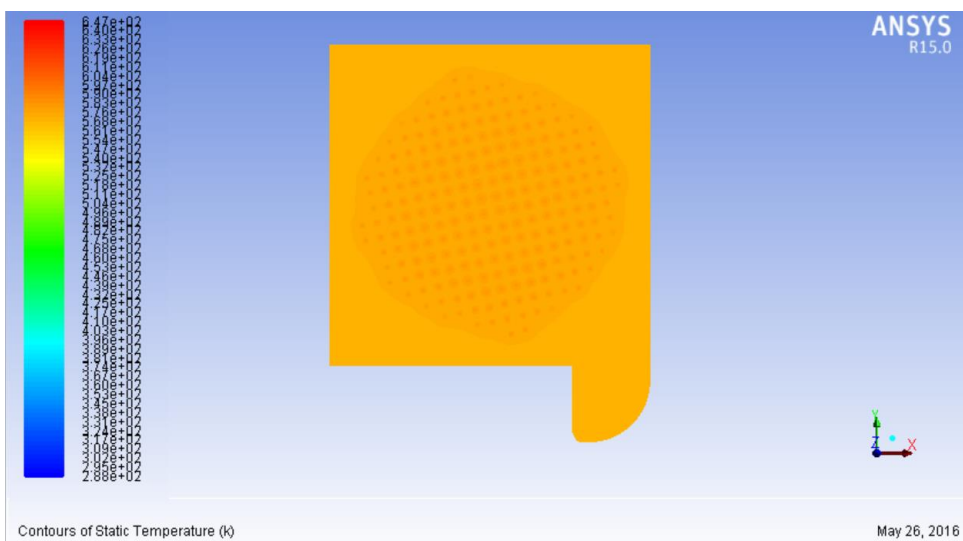
Il collettore, Figura 7. 159, presenta una zona più calda nella zona di contatto con i distanziatori. La temperatura massima raggiunta è pari a 297 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State e questo è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui, non essendo presente acqua, si è imposta una temperatura di parete fissa. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 286 °C.



**Figura 7. 157** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=400$  soli

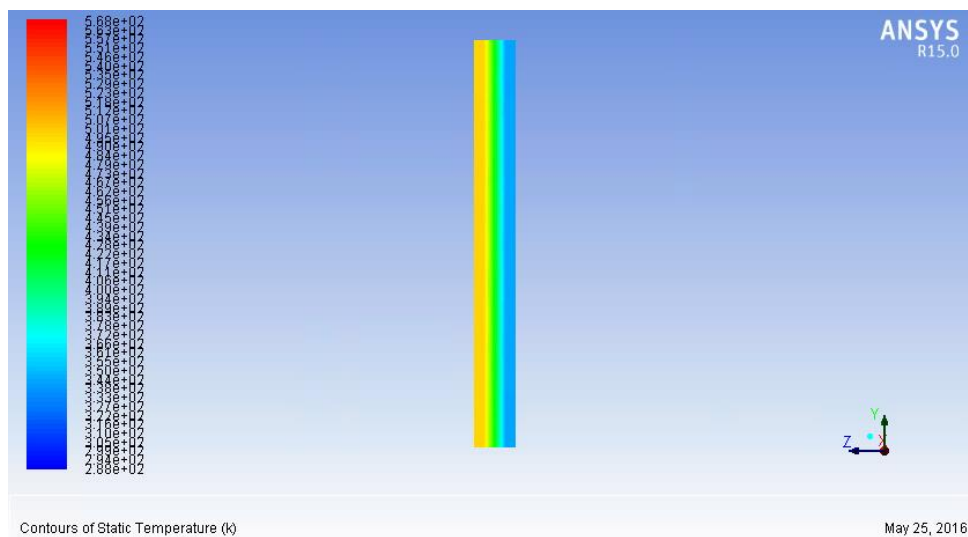


**Figura 7. 158** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=400$  soli

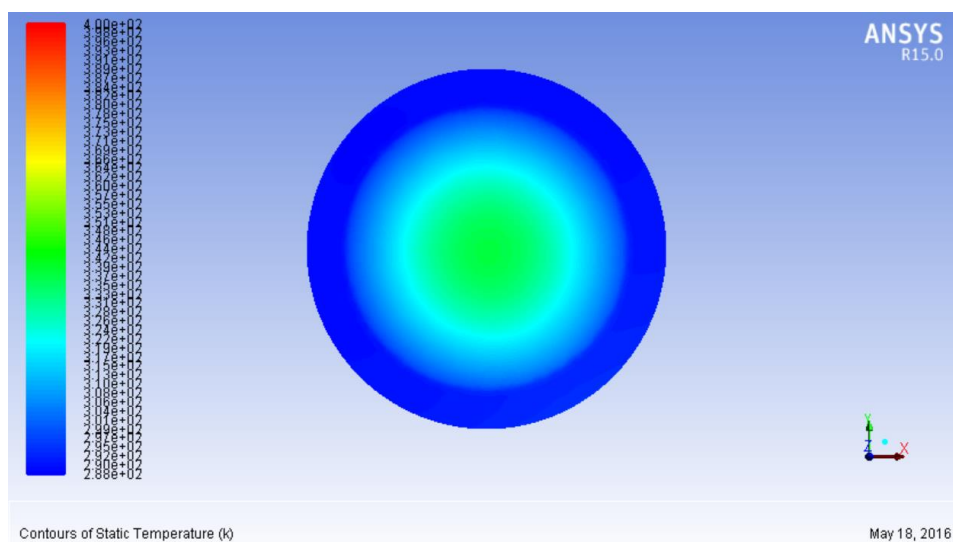


**Figura 7. 159** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=400$  soli

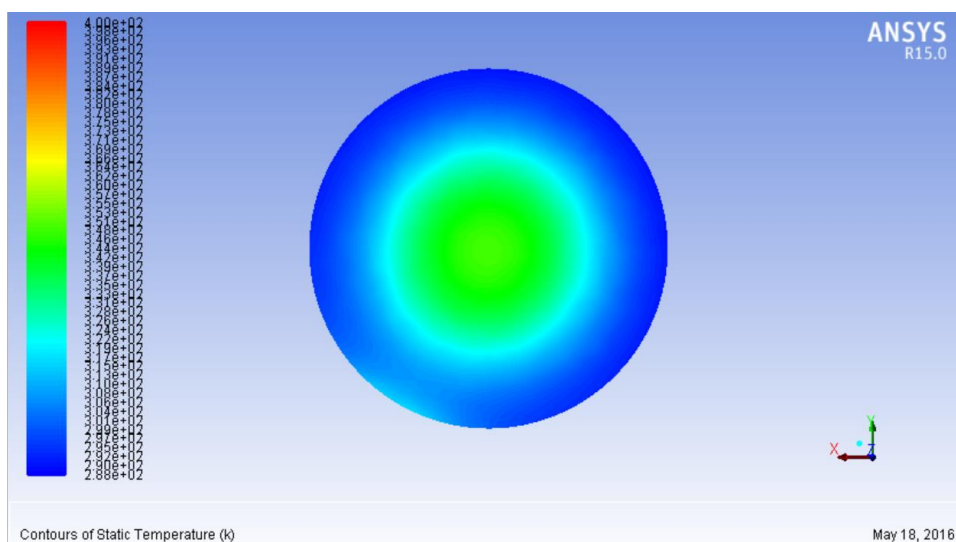




**Figura 7. 160** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli



**Figura 7. 161** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=300 soli



**Figura 7. 162** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli

In Figura 7. 160 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 280 °C mentre il lato freddo 88,3 °C. La temperatura nella finestra, Figura 7. 161 e Figura 7. 162, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 71 °C contro gli 85 °C della simulazione con Steady State.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 326 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 4,4 W, di cui 0,12 W sono scambiati nel gap interelettrodico e della restante potenza circa 4,25 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto e l'anello distanziatore è pari a 321,6 W.

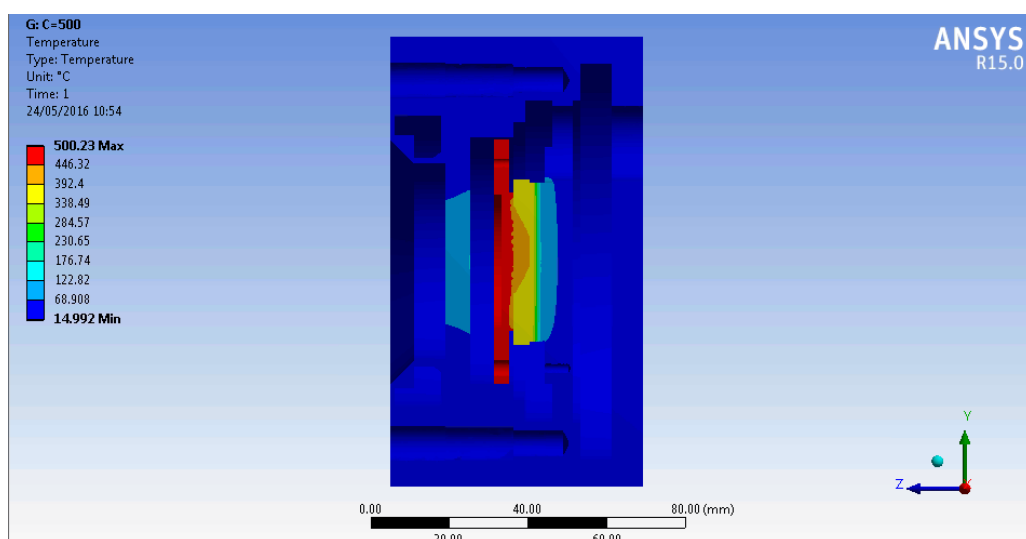
Nel collettore la potenza entrante è pari a 224,1 W di cui 224 W sono scambiati per conduzione e 0,1 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 41 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,43 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 182 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 182 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 9,1 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,57 W. la restante potenza, 172 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 5 W, di cui 3,58 W vengono scambiati con il dissipatore, 0,46 W per conduzione con la flangia e 0,94 per convezione con l'esterno.

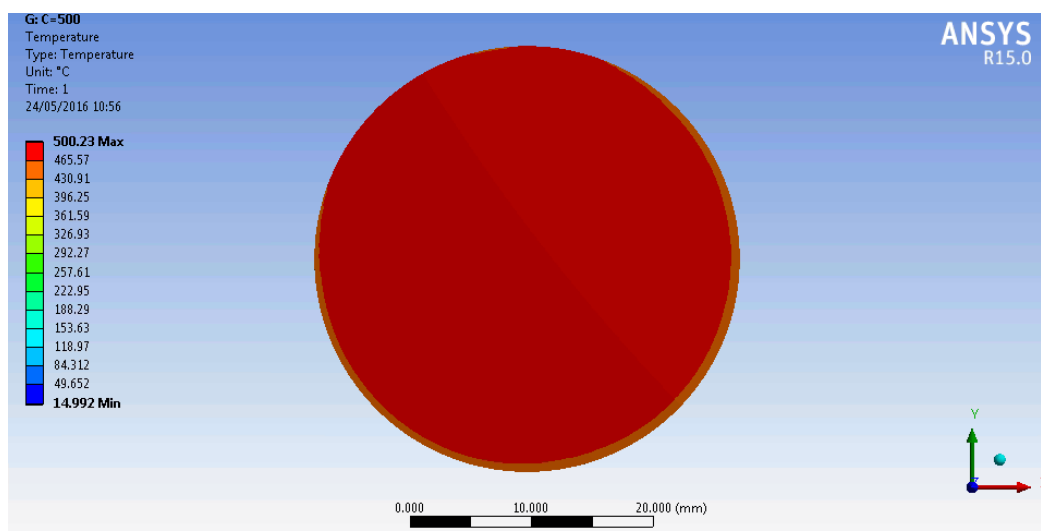
Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 500 soli.

In Figura 7. 163 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 500,2 °C.

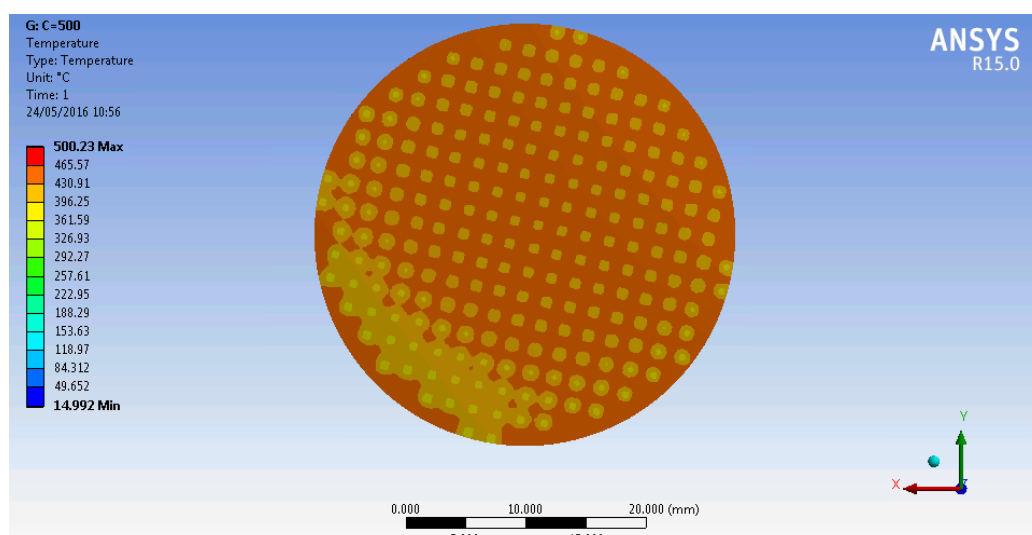


**Figura 7. 163** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=500 soli

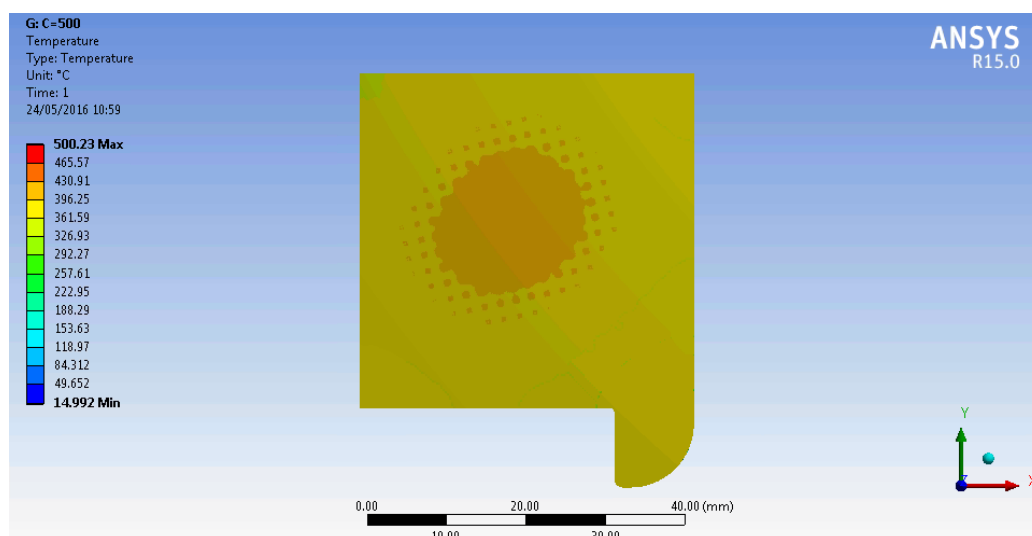




**Figura 7. 164** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli



**Figura 7. 165** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli

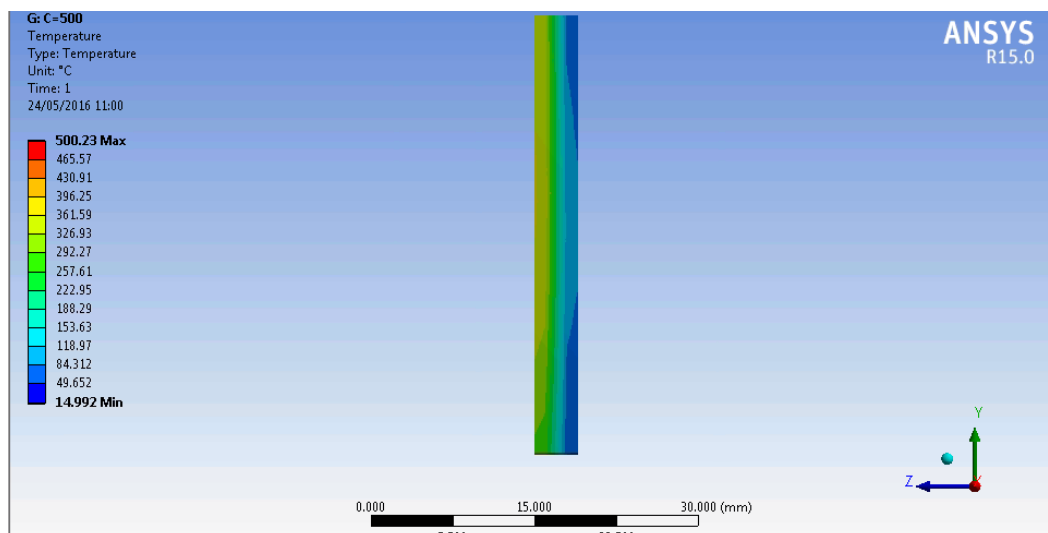


**Figura 7. 166** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli

Anche in questo caso la temperatura della superficie dell'assorbitore-emettitore, lato finestra, si mantiene circa omogenea, Figura 7. 164.

Nel collettore, Figura 7. 166, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia con i distanziatori. La temperatura del collettore sul lato interfacciante il gap interelettrodico differisce di circa cinquanta gradi da quella dell'assorbitore-emettitore. Si omette di riportare l'immagine della superficie del collettore che si interfaccia con il modulo termoelettrico in quanto si porta ad una temperatura omogenea e pari a 380 °C.

Il lato caldo del modulo termoelettrico, Fig., si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 361 °C, mentre il lato freddo pari a 95 °C.



**Figura 7. 167** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli

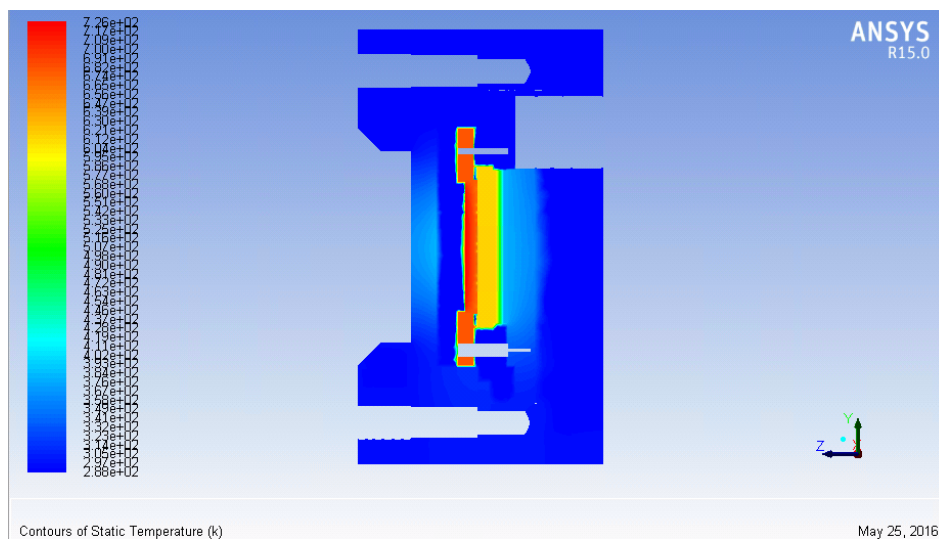
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 149 e Figura 7. 150, ma in un range di temperatura compreso tra 124,79 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 101 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo. Tali temperature sono molto inferiori rispetto a quelle raggiunte nei due casi (anello di stanziatore da 100 e 10 µm) precedenti e questo è dovuto alla più bassa temperatura raggiunta dall'assorbitore.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

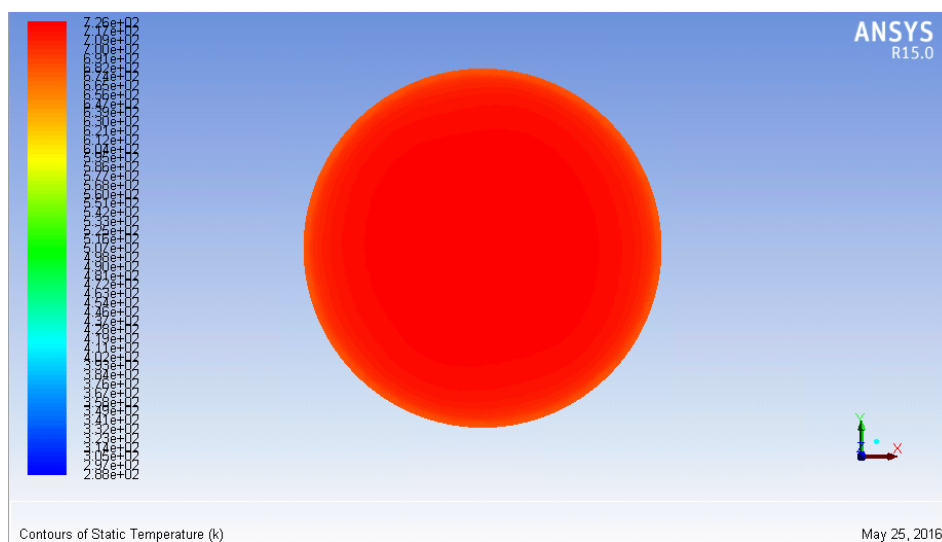
In Figura 7. 168 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 169 e Figura 7. 170 ,segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 453 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con i distanziatori ed è pari a 350 °C.

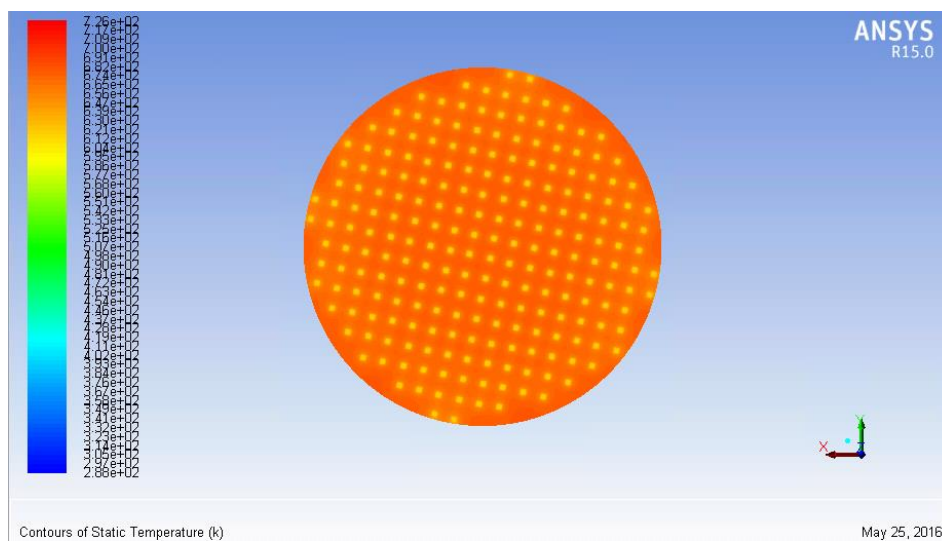
Il collettore, Figura 7. 171, presenta una zona più calda nella zona di contatto con i distanziatori. La temperatura massima raggiunta è pari a 348 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State e questo è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui, non essendo presente acqua, si è imposta una temperatura di parete fissa. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 337 °C.



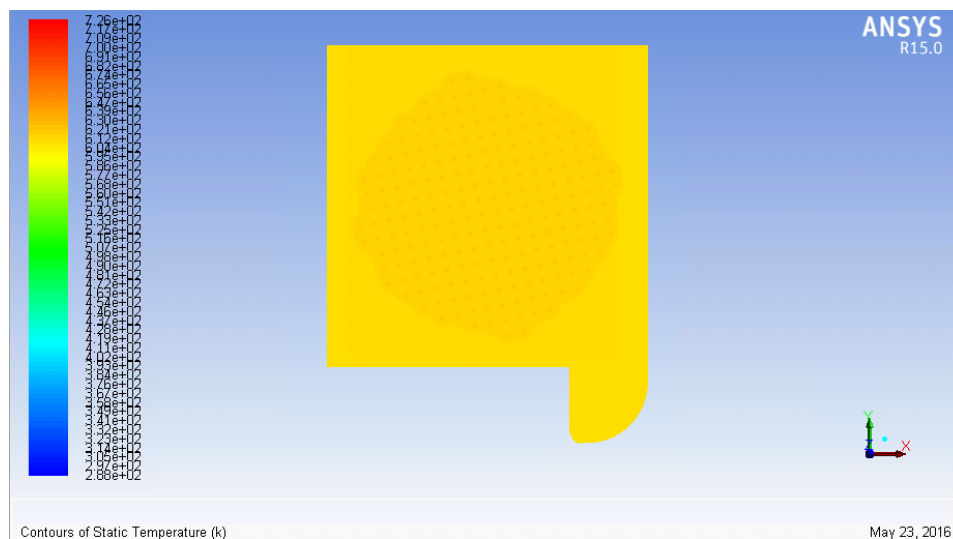
**Figura 7. 168** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli



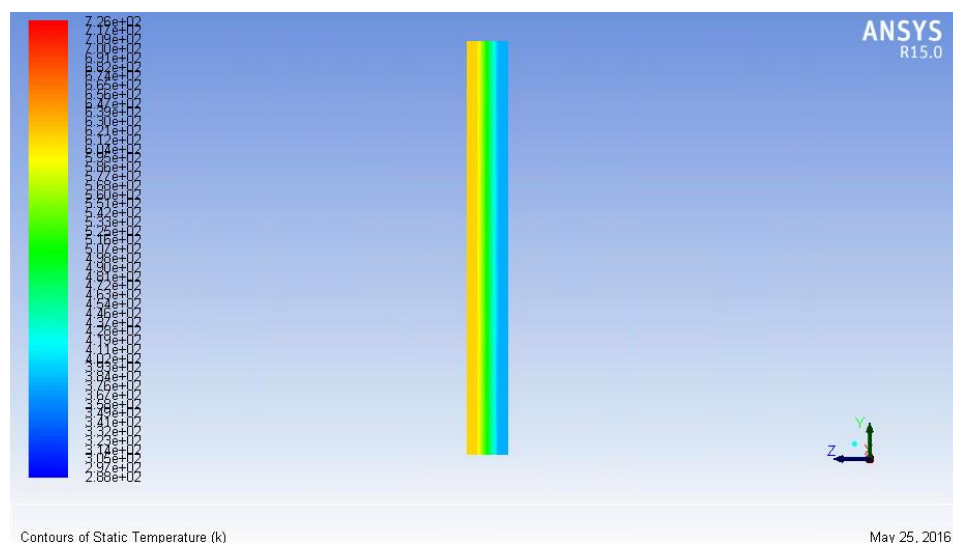
**Figura 7. 169** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C5=00 soli



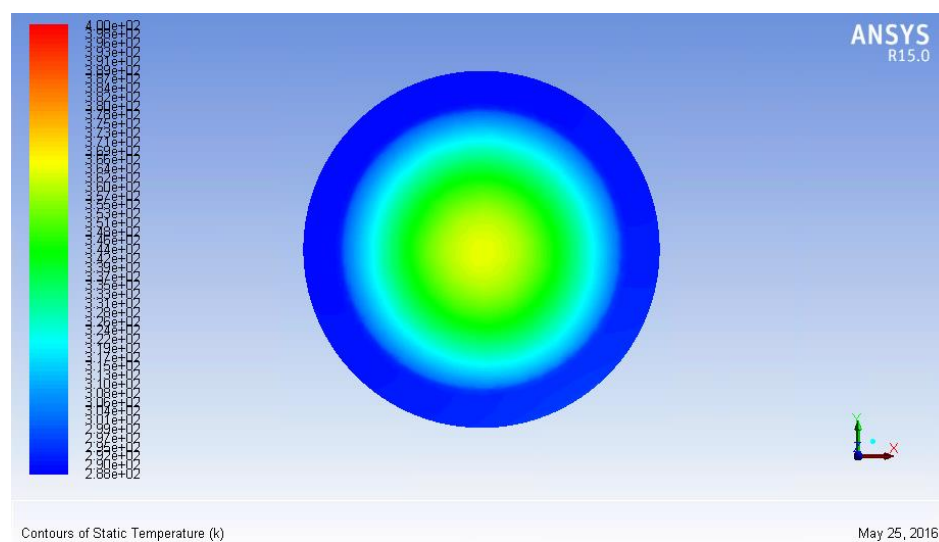
**Figura 7. 170** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=500 soli



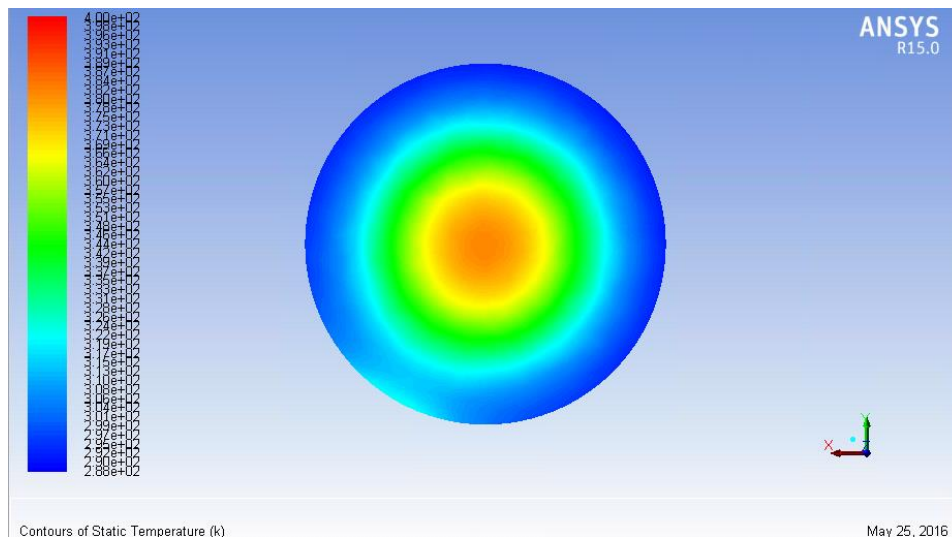
**Figura 7. 171** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli



**Figura 7. 172** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli



**Figura 7. 173** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli



**Figura 7. 174** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per  $C=500$  soli

Nelle Figura 7. 172 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di  $331\text{ }^{\circ}\text{C}$  mentre il lato freddo  $101\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura nella finestra, Figura 7. 173 e Figura 7. 174, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa  $109\text{ }^{\circ}\text{C}$  contro gli  $124,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  della simulazione con Steady State.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a  $408\text{ W}$ . La potenza scambiata per irraggiamento è pari a  $7\text{ W}$ , di cui  $0,2\text{ W}$  sono scambiati nel gap interelettrodico e della restante potenza circa  $6,7\text{ W}$  vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto e l'anello distanziatore è pari a  $401,6\text{ W}$ .

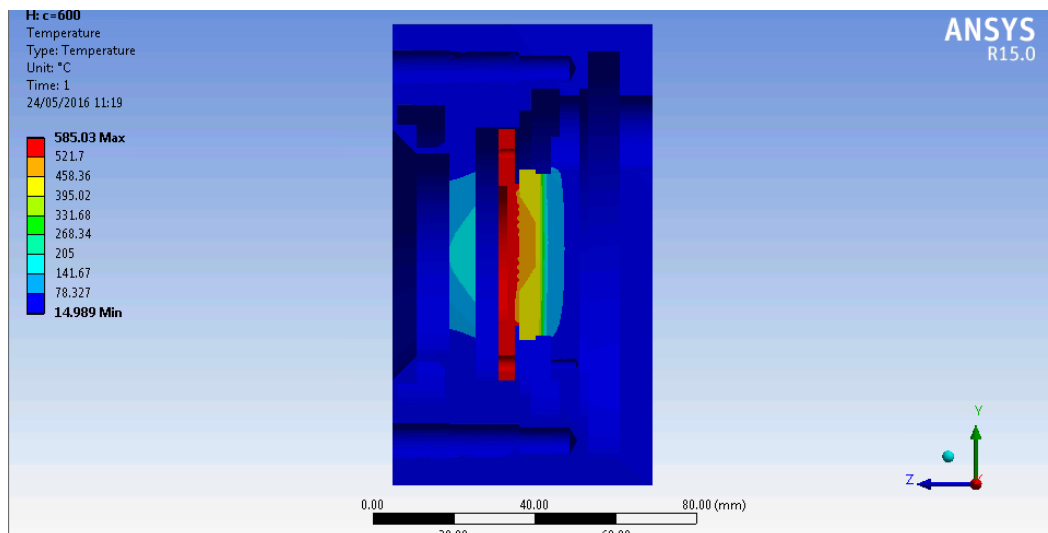
Nel collettore la potenza entrante è pari a  $273,3\text{ W}$  di cui  $273,12\text{ W}$  sono scambiati per conduzione e  $0,18\text{ W}$  per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in  $50\text{ W}$  scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra,  $0,63\text{ W}$  scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti  $222,670\text{ W}$  sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a  $222,67\text{ W}$ . La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari  $11,13\text{ W}$ . La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a  $0,79\text{ W}$ . la restante potenza,  $208,88\text{ W}$ , è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

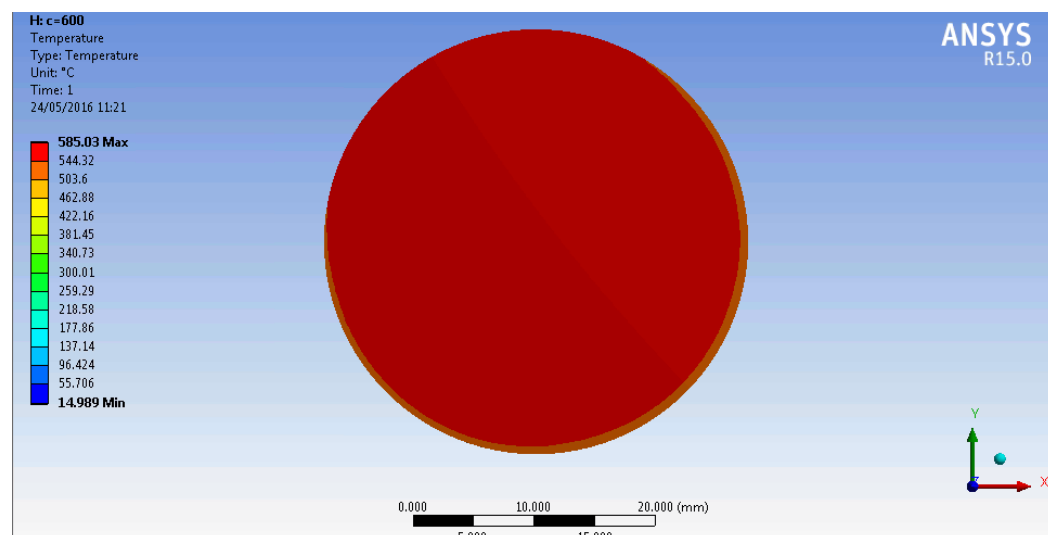
Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a  $7,15\text{ W}$ , di cui  $4,89\text{ W}$  vengono scambiati con il dissipatore,  $0,85\text{ W}$  per conduzione con la flangia e  $1,4$  per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a  $600$  soli.

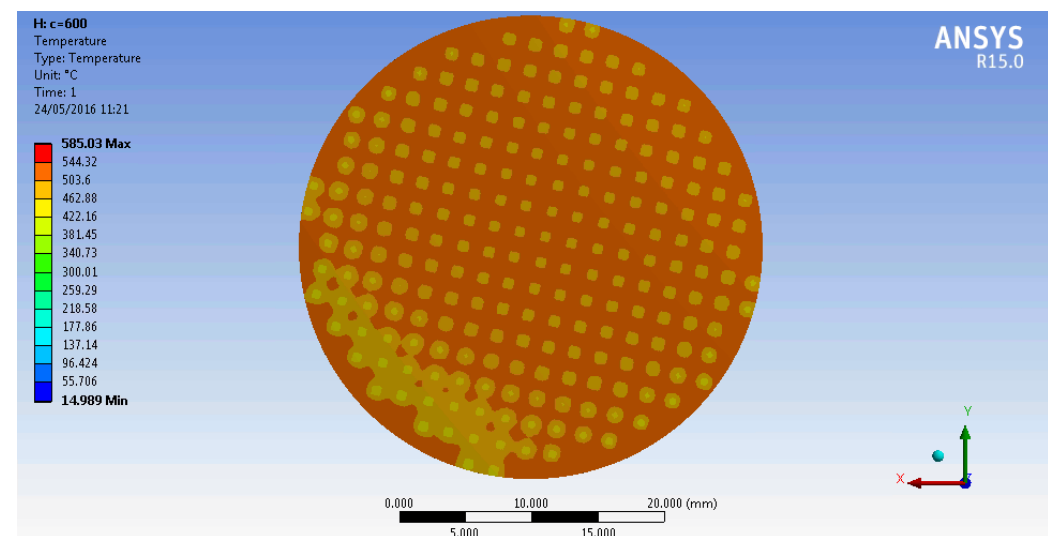
In Figura 7. 175 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a  $585\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



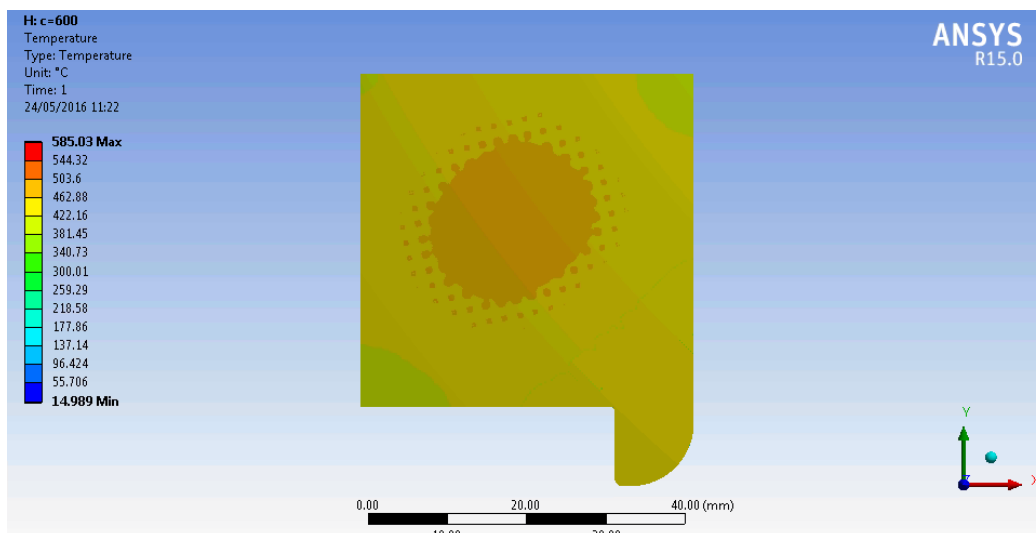
**Figura 7. 175** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli



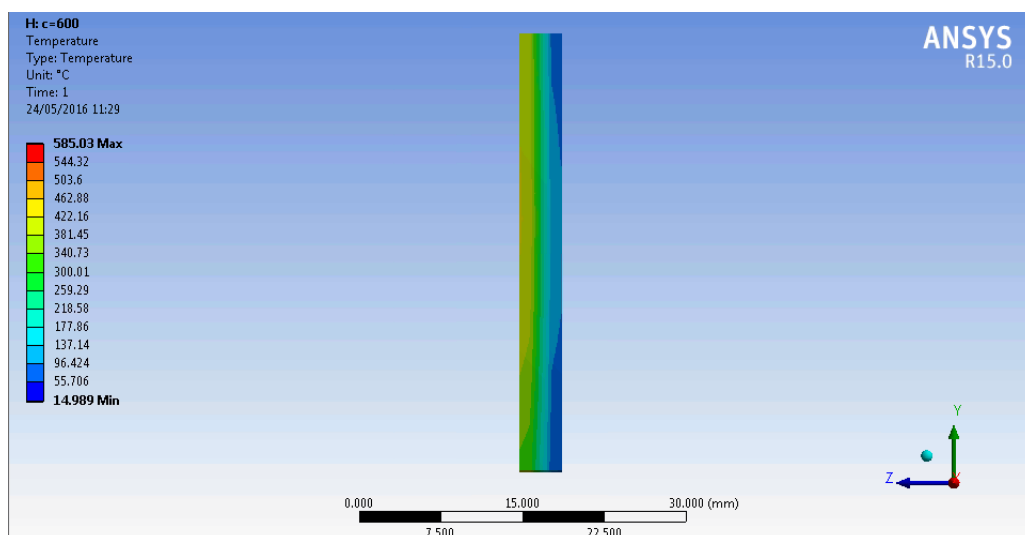
**Figura 7. 176** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli



**Figura 7. 177** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli



**Figura 7. 178** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli



**Figura 7. 179** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli

Come si può notare in Figura 7. 176 la temperatura si mantiene pressoché omogenea al di fuori di una piccola zona nella parte periferica e questo sta ad indicare le maggiori dispersioni dovute ai distanziatori collocati sul lato opposto, Figura 7. 177.

Nel collettore, Figura 7. 178, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia con i distanziatori. La temperatura del collettore sul lato interfacciante il gap interelettrodico differisce di circa cinquanta gradi da quella dell'assorbitore-emettitore. Si omette di riportare l'immagine della superficie del collettore che si interfaccia con il modulo termoelettrico in quanto si porta ad una temperatura omogenea e pari a 435 °C.

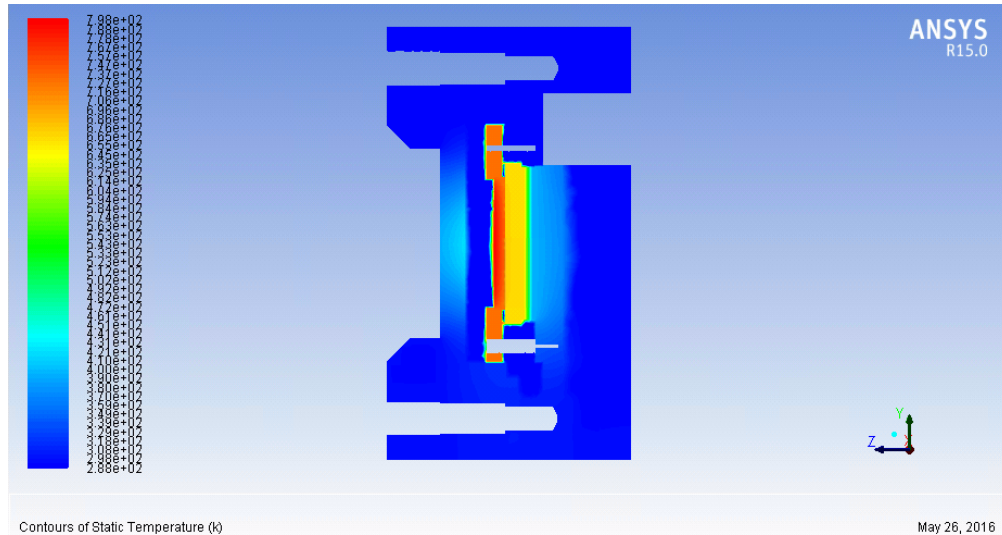
Il lato caldo del modulo termoelettrico, Fig., si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 433 °C, mentre il lato freddo pari a 130 °C.

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 149 e Figura 7. 150, ma in un range di temperatura compreso tra 174,46 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 149 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo. Tali temperature sono molto inferiori rispetto a quelle

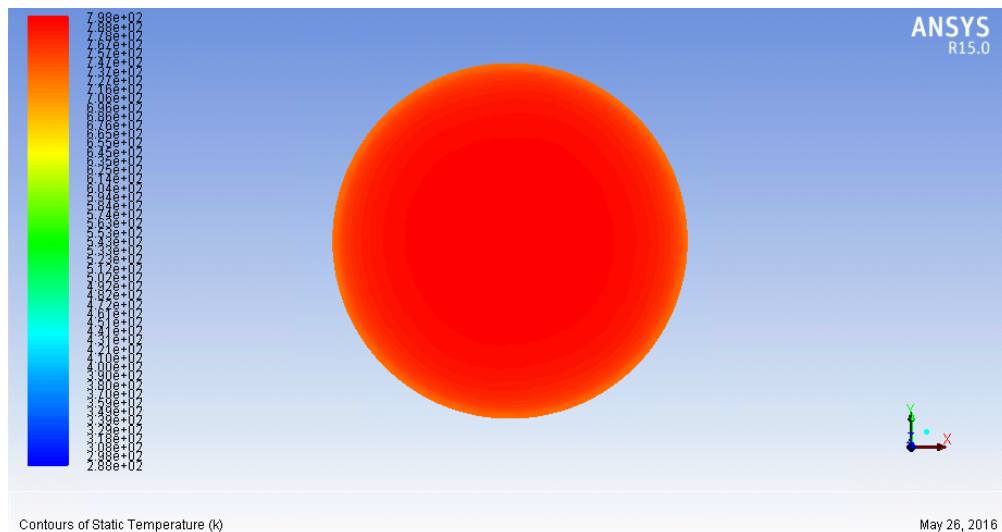


raggiunte nei due casi (anello di stanziatore da 100 e 10  $\mu\text{m}$ ) precedenti e questo è dovuto alla più bassa temperatura raggiunta dall'assorbitore.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



**Figura 7. 180** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli



**Figura 7. 181** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli

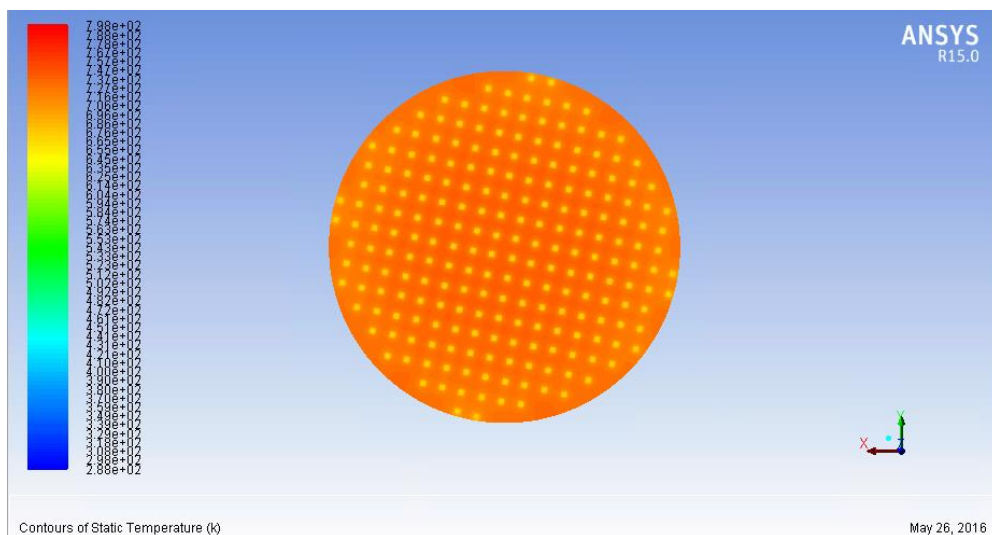
In Figura 7. 180 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 181 e Figura 7. 182, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 524,9  $^{\circ}\text{C}$ , è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con i distanziatori ed è pari a 402,3  $^{\circ}\text{C}$ .

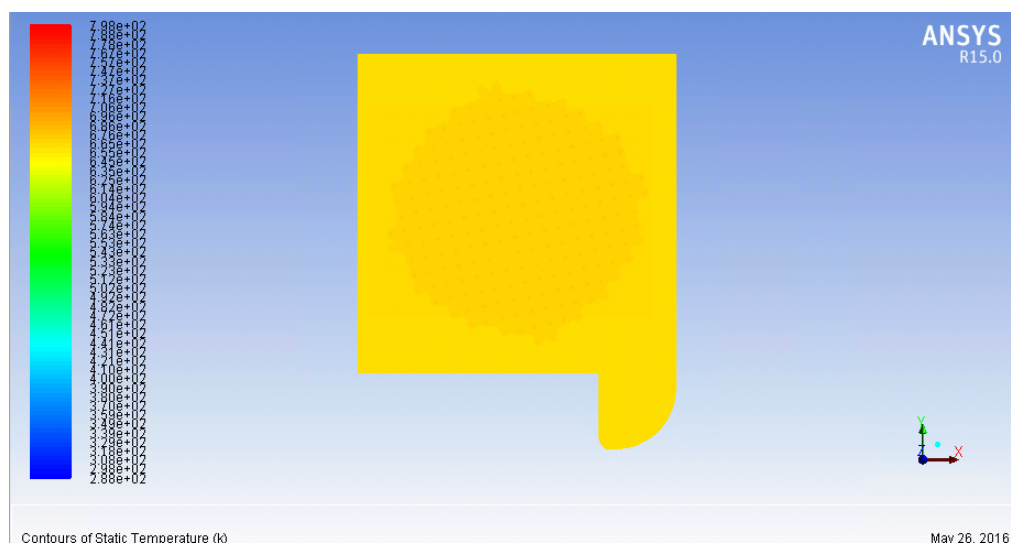
Il collettore, Figura 7. 183, presenta una zona più calda nella zona di contatto con i distanziatori. La temperatura massima raggiunta è pari a 400 soli  $^{\circ}\text{C}$ .

Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State e questo è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui, non essendo presente acqua, si è imposta una temperatura di parete fissa. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 390  $^{\circ}\text{C}$ .

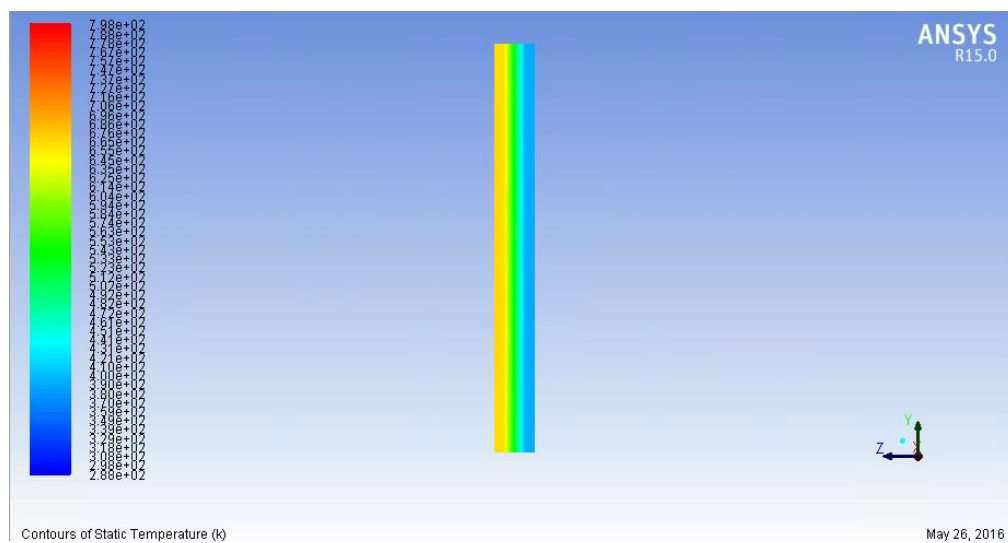




**Figura 7. 182** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=600$  soli



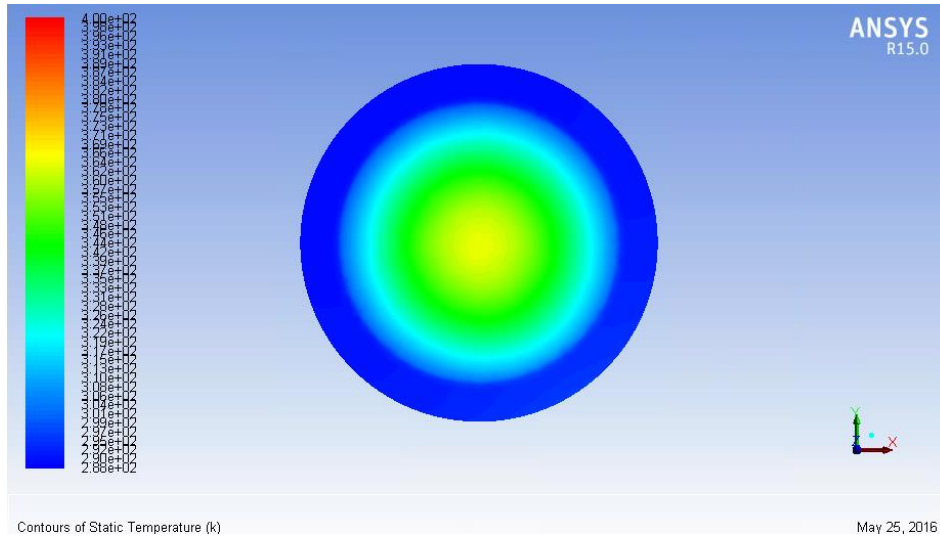
**Figura 7. 183** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=600$  soli



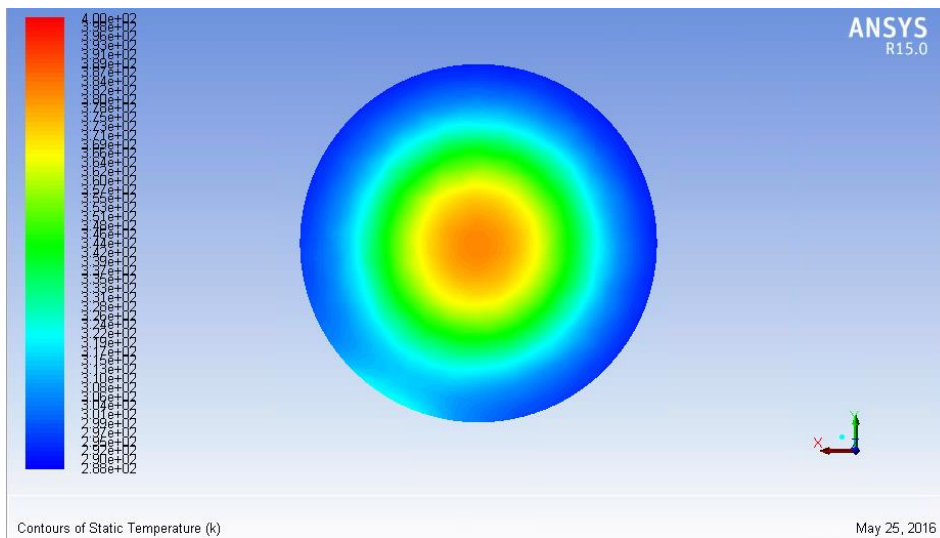
**Figura 7. 184** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=600$  soli

In Figura 7. 184 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di  $388\text{ }^{\circ}\text{C}$  mentre il lato freddo  $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La temperatura nella finestra, Figura 7. 185 e Figura 7. 186, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 147,7 °C contro gli 174,5 °C della simulazione con Steady State.



**Figura 7. 185** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=600 soli



**Figura 7. 186** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

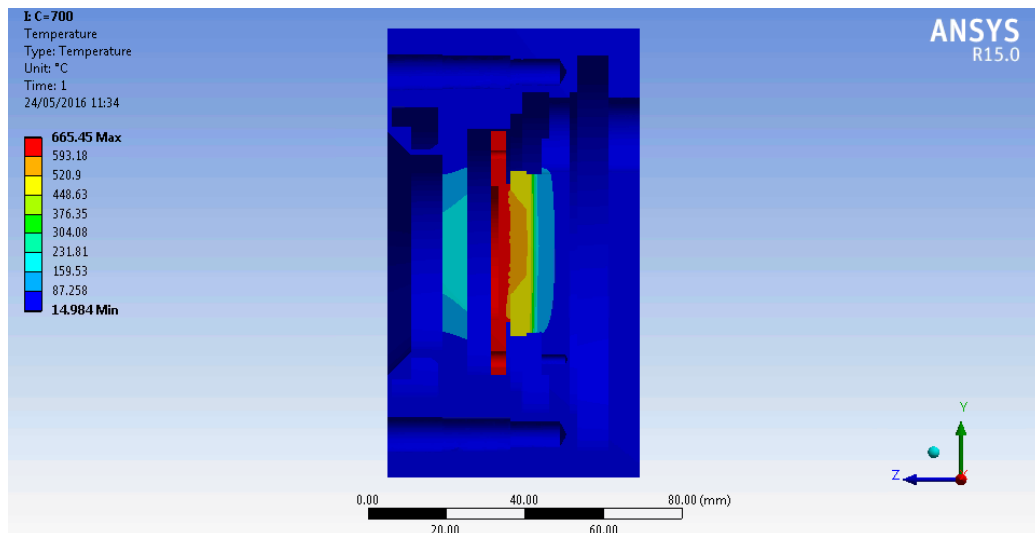
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 490 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 9,6 W, di cui 0,27 W sono scambiati nel gap interelettrodico e della restante potenza circa 9,25 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto e l'anello distanziatore è pari a 480,72 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 303,5 W di cui 303,24 W sono scambiati per conduzione e 0,26 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 60 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,88 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 243,4 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

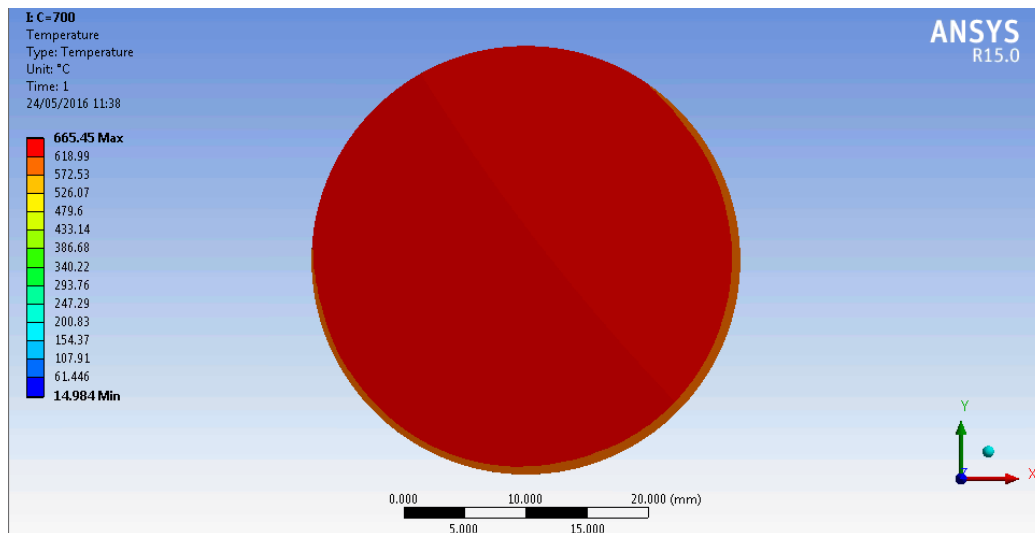
La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 243,4 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 12,16 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 1,07 W. la restante potenza, 230,16 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 10,55 W, di cui 6,86 W vengono scambiati con il dissipatore, 1,53 W per conduzione con la flangia e 2,15 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 700 soli.



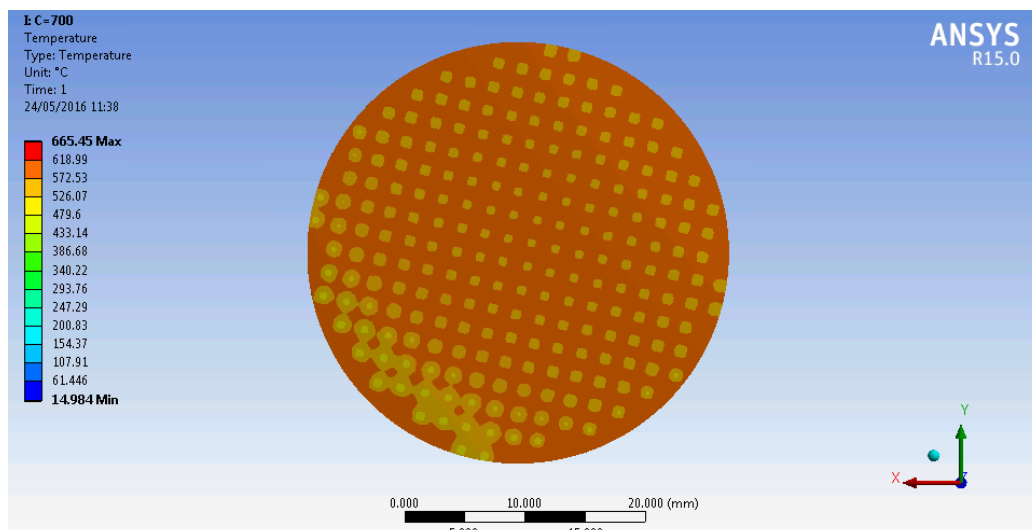
**Figura 7. 187** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli



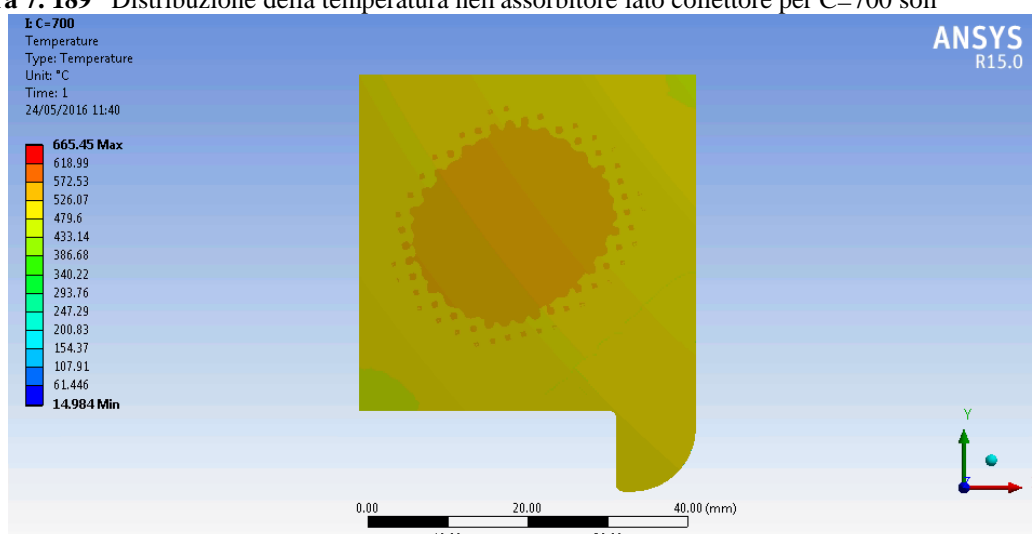
**Figura 7. 188** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli

In Figura 7. 187 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 665 °C.

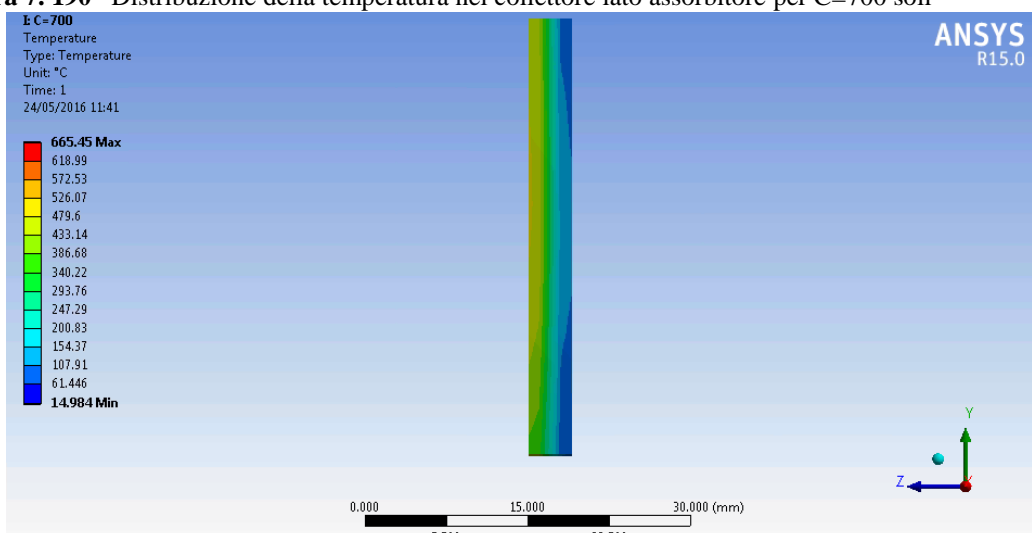
Come si può notare in Figura 7. 188 la temperatura si mantiene pressoché omogenea al di fuori di una piccola zona nella parte periferica e questo sta ad indicare le maggiori dispersioni dovute ai distanziatori collocati sul lato opposto, Figura 7. 189.



**Figura 7. 189** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli



**Figura 7. 190** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli



**Figura 7. 191** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli

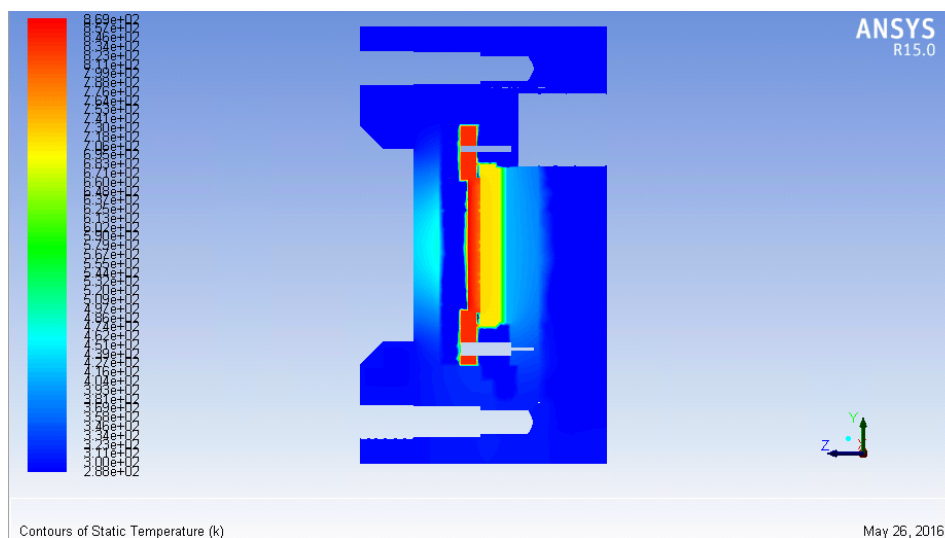
Nel collettore, Figura 7. 190, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia con i distanziatori. La temperatura del collettore sul lato interfacciante il gap interelettrodico differisce di circa cinquanta gradi da quella dell'assorbitore-emettitore. Si omette di

riportare l'immagine della superficie del collettore che si interfaccia con il modulo termoelettrico in quanto si porta ad una temperatura omogenea e pari a 502 °C.

Il lato caldo del modulo termoelettrico, Figura 7. 191, si porta ad una temperatura circa omogenea e pari a 483 °C, mentre il lato freddo pari a 145 °C.

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 149 e Figura 7. 150, ma in un range di temperatura compreso tra 231,4 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 192 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo. Tali temperature sono molto inferiori rispetto a quelle raggiunte nei due casi (anello di stanziatore da 100 e 10 µm) precedenti e questo è dovuto alla più bassa temperatura raggiunta dall'assorbitore.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

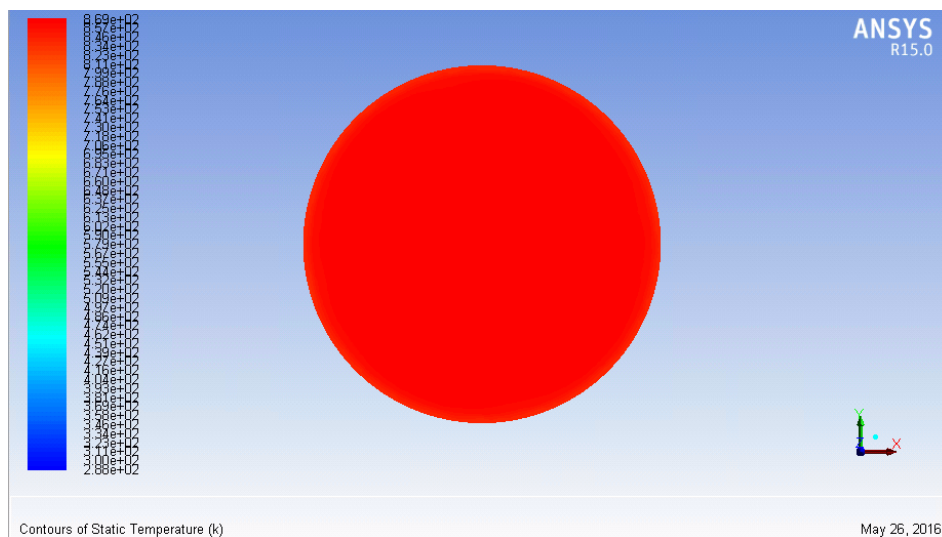


**Figura 7. 192** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli

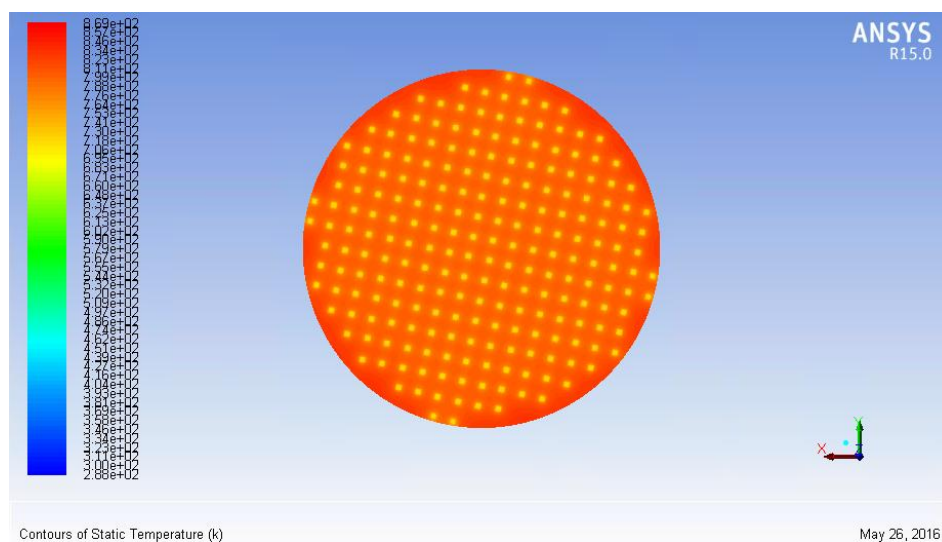
In Figura 7. 192 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 193 e Figura 7. 194, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 524,9 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con i distanziatori ed è pari a 402,3 °C.

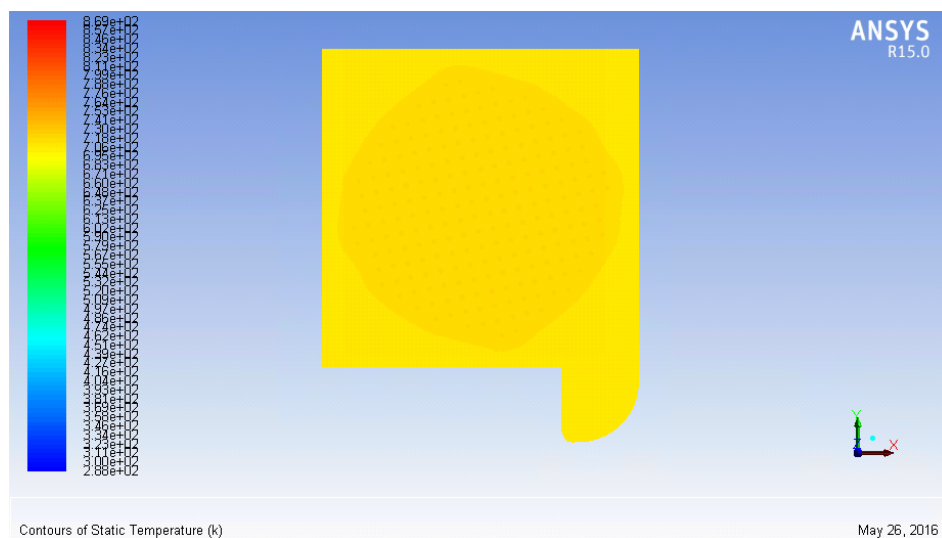
Il collettore, Figura 7. 195 presenta una zona più calda nella zona di contatto con i distanziatori. La temperatura massima raggiunta è pari a 444 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al caso con Steady State e questo è dovuto alla presenza dell'acqua fluente nel corpo di flangia che asporta una quantità di calore maggiore rispetto al caso affrontato con Steady State in cui, non essendo presente acqua, si è imposta una temperatura di parete fissa. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 427 °C



**Figura 7. 193** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=700$  soli

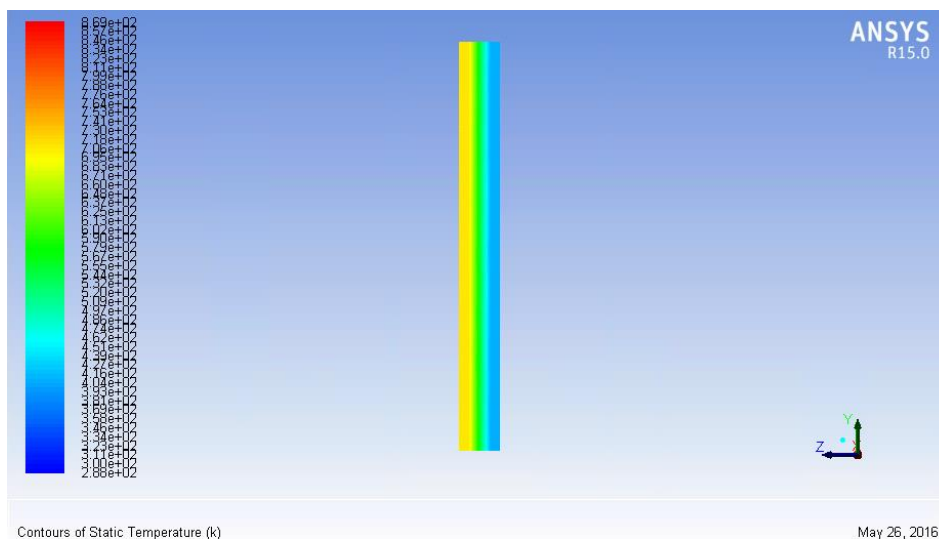


**Figura 7. 194** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=700$  soli

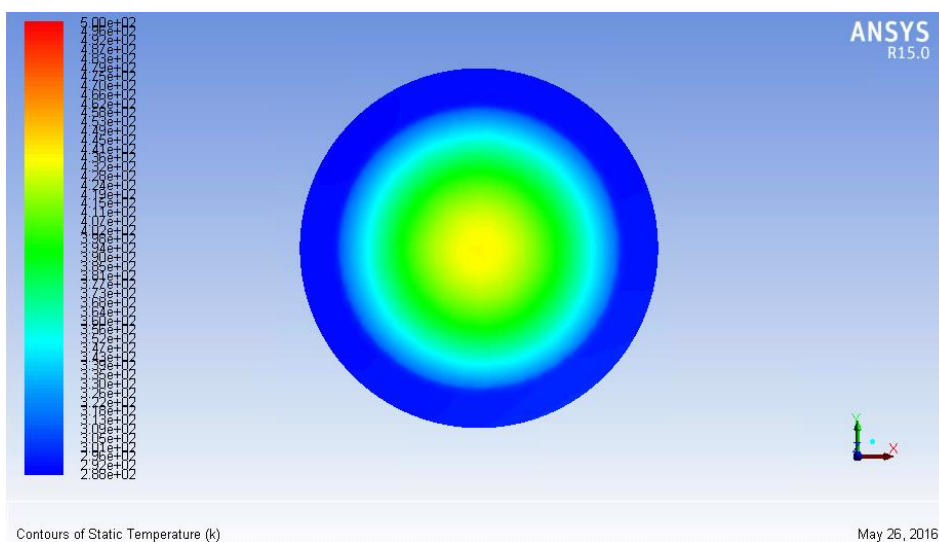


**Figura 7. 195** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=700$  soli

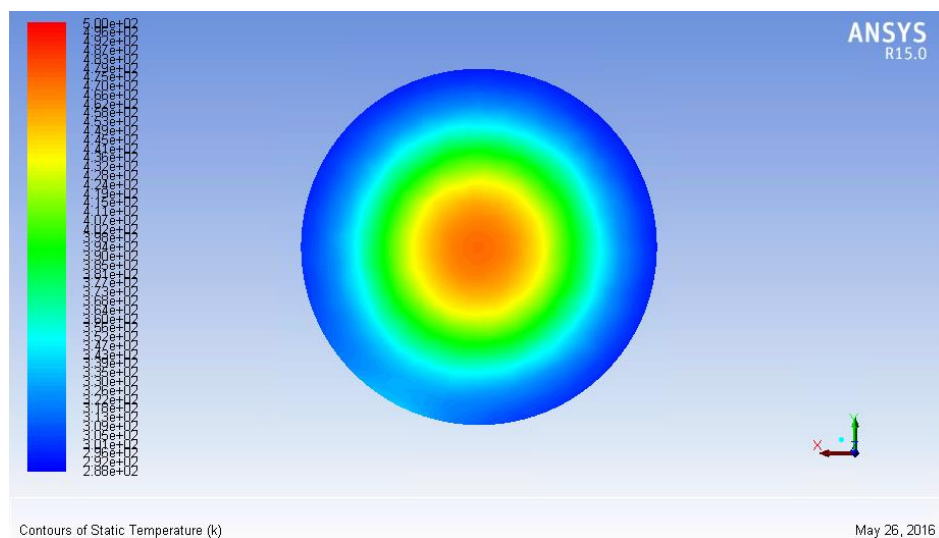




**Figura 7. 196** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli



**Figura 7. 197** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli



**Figura 7. 198** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli

In Figura 7. 196 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 420 °C mentre il lato freddo 136 °C.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 197 e Figura 7. 198, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 202 °C contro gli 231,4 °C della simulazione con Steady State.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

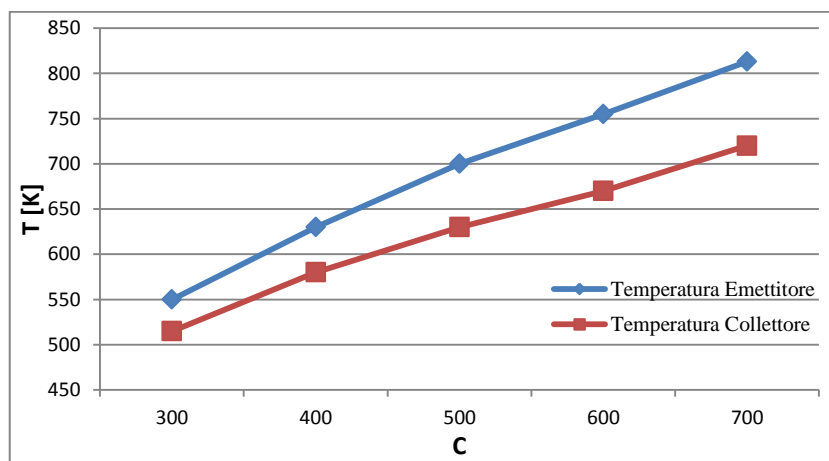
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 572 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 14,2 W, di cui 0,48 W sono scambiati nel gap interelettrodo e della restante potenza circa 13,7 W vengono scambiati con la finestra. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto e l'anello distanziatore è pari a 556,82 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 346,26 W di cui 345,8 W sono scambiati per conduzione e 0,46 W per irraggiamento. La potenza uscente si suddivide in 72 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 1,06 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 273,2 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 273,2 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 14,8 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 1,38 W. la restante potenza, 257,02 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

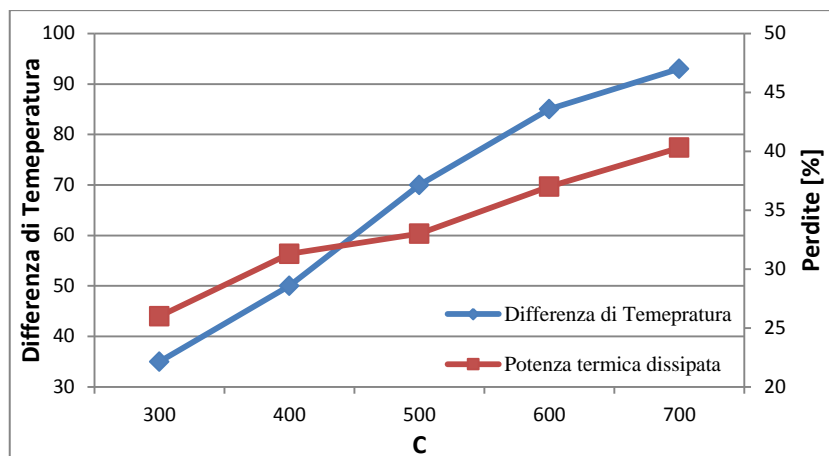
Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 16,1 W, di cui 9,94 W vengono scambiati con il dissipatore, 2,85 W per conduzione con la flangia e 3,9 per convezione con l'esterno.

In Figura 7. 199 si riportano gli andamenti della temperatura media delle superfici degli elettrodi. Come si può notare la differenza di temperatura aumenta all'aumentare della potenza entrante poiché cresce la percentuale di potenza termica che l'emettitore disperde con finestra, ghiera di sostegno, Flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia, Figura 7. 200. Quindi all'aumentare di tale valore ho il duplice vantaggio di aumento della temperatura dell'emettitore e della differenza di temperatura tra emettitore e collettore.

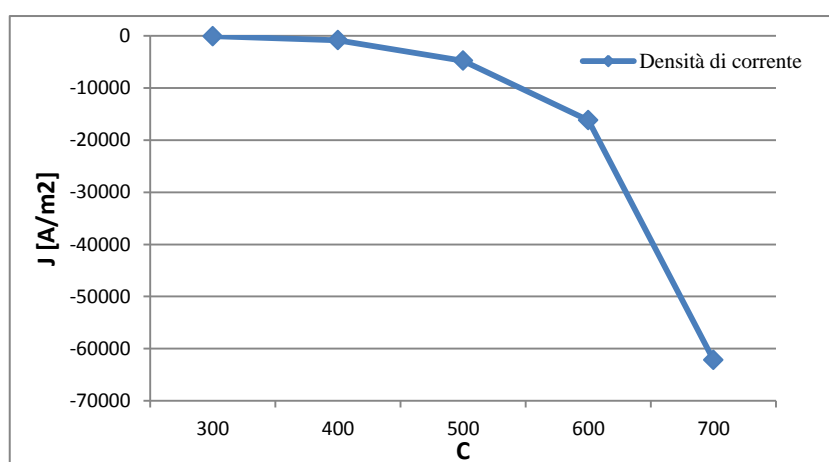


**Figura 7. 199** Andamenti delle temperature medie nel modulo termoionico

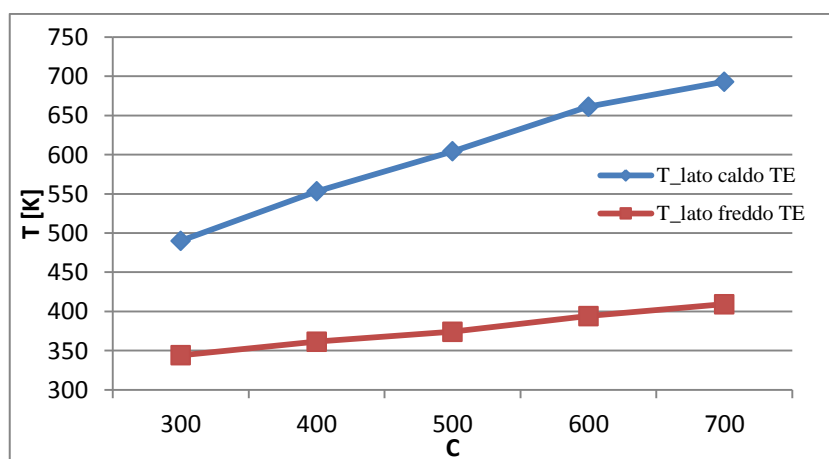




**Figura 7. 200** Andamento differenza di temperatura nel modulo termoionico e della potenza termica scambiata dall'assorbitore con ghiera, finestra e flangia



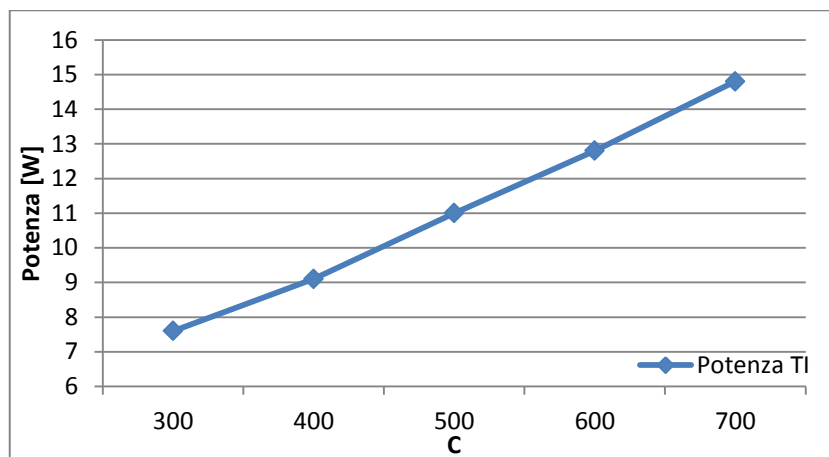
**Figura 7. 201** Andamento della densità di corrente prodotta dal modulo termoionico al variare del fattore di concentrazione



**Figura 7. 202** Andamento temperature nel modulo termoelettrico

In Figura 7. 201 si riporta l'andamento della densità di corrente prodotta dal modulo termoionico. Come si può notare tali valori sono negativi. Ciò accade poiché la densità di corrente riemessa dal collettore supera quella emessa dall'emettitore. In questo caso l'unico componente di produzione di potenza elettrica è il modulo termoelettrico.

In Figura 7. 202 e Figura 7. 203 si riportano le temperature medie del lato caldo e del lato freddo del modulo termoelettrico e la potenza prodotta dal modulo per i diversi fattori di concentrazione. Anche in questo caso le temperature aumentano all'aumentare della radiazione entrante poiché come si è visto dall'analisi delle potenze aumenta la potenza entrante nel modulo e questo comporta anche un aumento della potenza prodotta dal modulo calcolata come il 5% della potenza entrante. La temperatura raggiunta dal lato caldo per fattori di concentrazione superiori a 600 soli è troppo elevata per garantire il corretto funzionamento del componente.



**Figura 7. 203** Andamento della potenza prodotta dal modulo termoelettrico

## 7.4 Distanziatori da 10 $\mu\text{m}$

Dall'analisi dei risultati ottenuti nei tre casi precedenti si è proposta una geometria costituita da 16 con distanziatori di base quadrata e spessore 10 $\mu\text{m}$ , di area di contatto complessiva inferiore rispetto ai casi precedenti e posizionati nella zona periferica dell'assorbitore-emettitore.

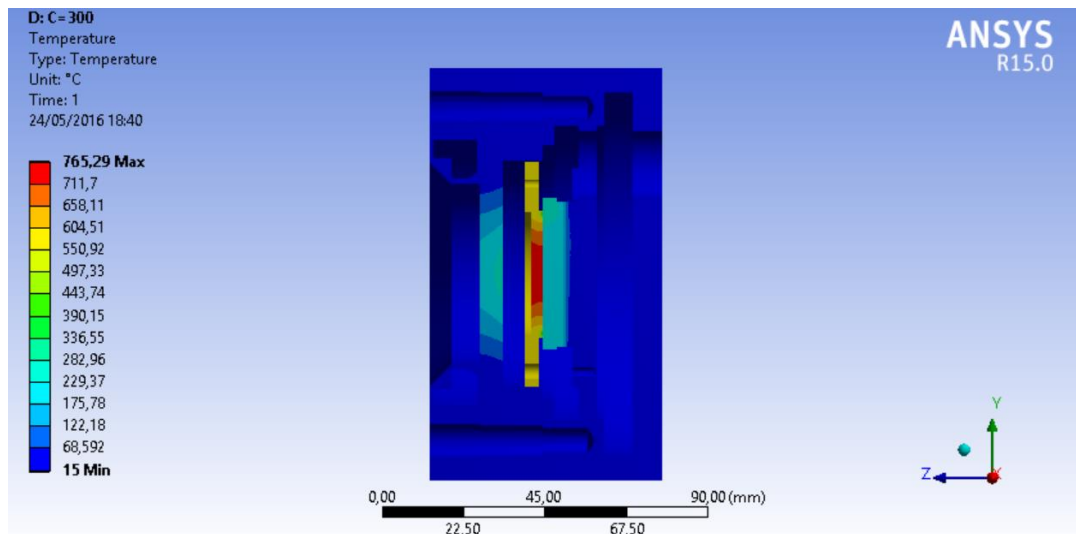
Di seguito si riporteranno le immagini relative alle distribuzioni di temperatura ottenute con il programma Steady State e con Fluent e i flussi termici ricavati dall'analisi su Fluent per differenti fattori di concentrazione, 300, 400, 500, 600 e 700 soli.

Come si è spiegato nel capitolo precedente, l'ampiezza del gap interelettrodico è tale da inibire il formarsi di effetti di carica spaziale. Questo permette di sfruttare le equazioni (40), (41), (43) e (46) per calcolare la potenza prodotta dal modulo termoelettrico e i tassi di raffreddamento e riscaldamento elettronico. In particolare la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento elettronico vengono imposti come flussi uscenti dalla superficie attiva dell'emettitore, mentre il tasso di riscaldamento elettronico viene imposto come flusso entrante nella superficie attiva del collettore. Le differenze di temperatura che si riscontrano tra l'analisi su Steady State e quella su Fluent sono dovute anche a questi flussi imposti oltre che all'introduzione dell'acqua negli scambiatori.

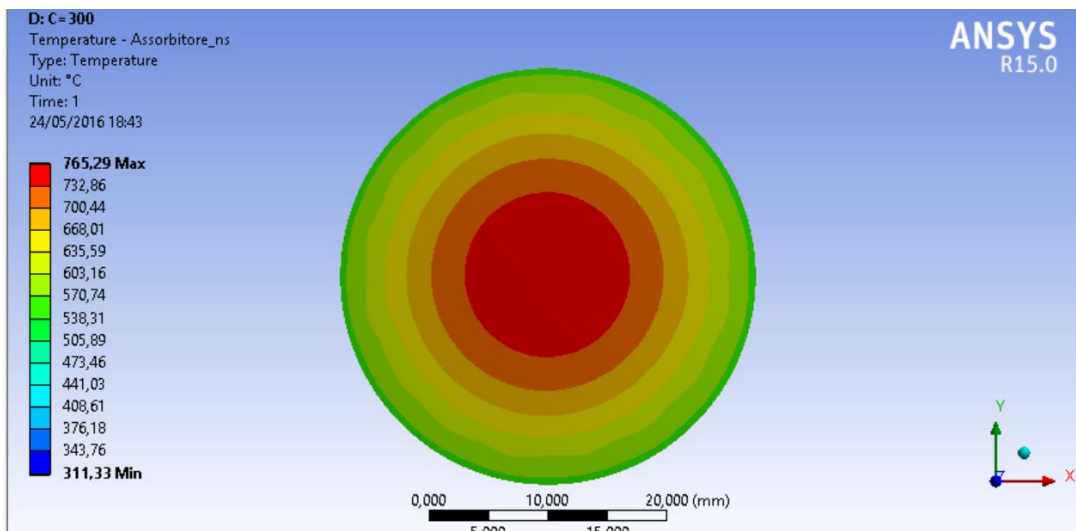
Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 300 soli.

In Figura 7. 204 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. I valori di temperatura sono riportati in  $^{\circ}\text{C}$ . Per comprendere tale figura si fa riferimento a Figura 7. 1. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 765,3  $^{\circ}\text{C}$ , tale valore è superiore rispetto a quello

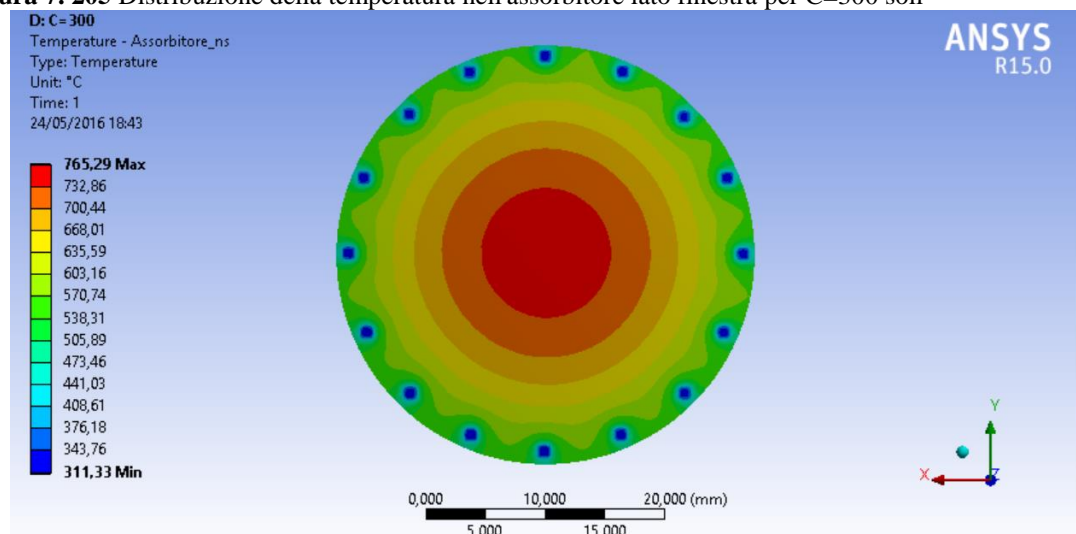
ottenuto nei casi con anello distanziatore da 10 $\mu$ m e 100 $\mu$ m. La minore area di contatto comporta una minore perdita di calore attraverso i distanziatori rispetto ai casi sopra citati.



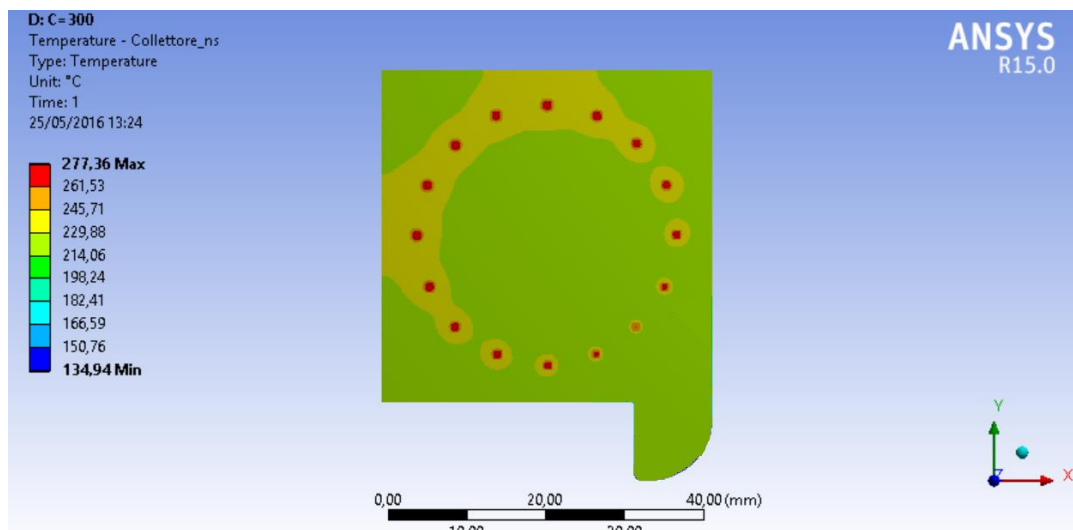
**Figura 7. 204** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli



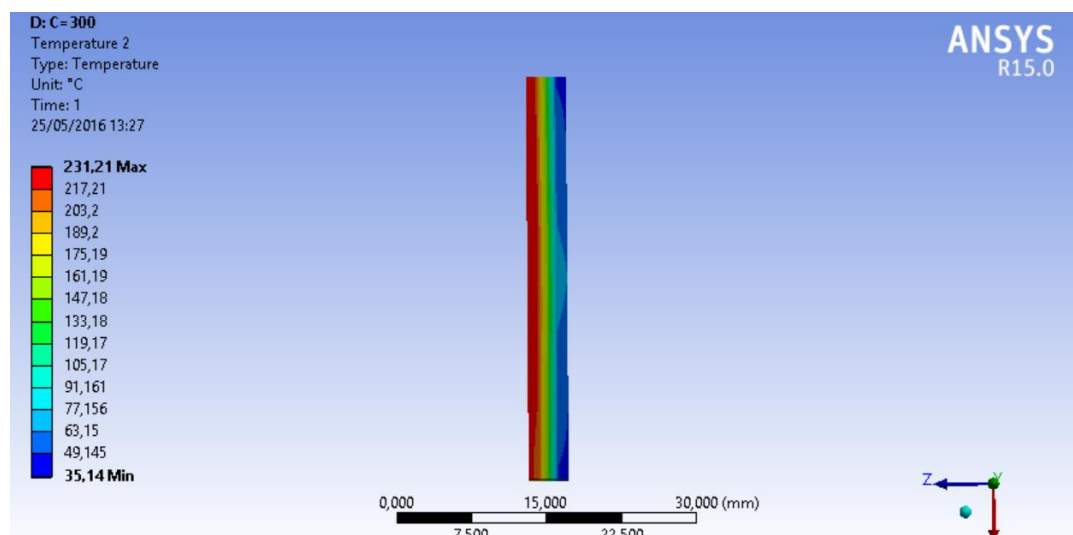
**Figura 7. 205** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=300 soli



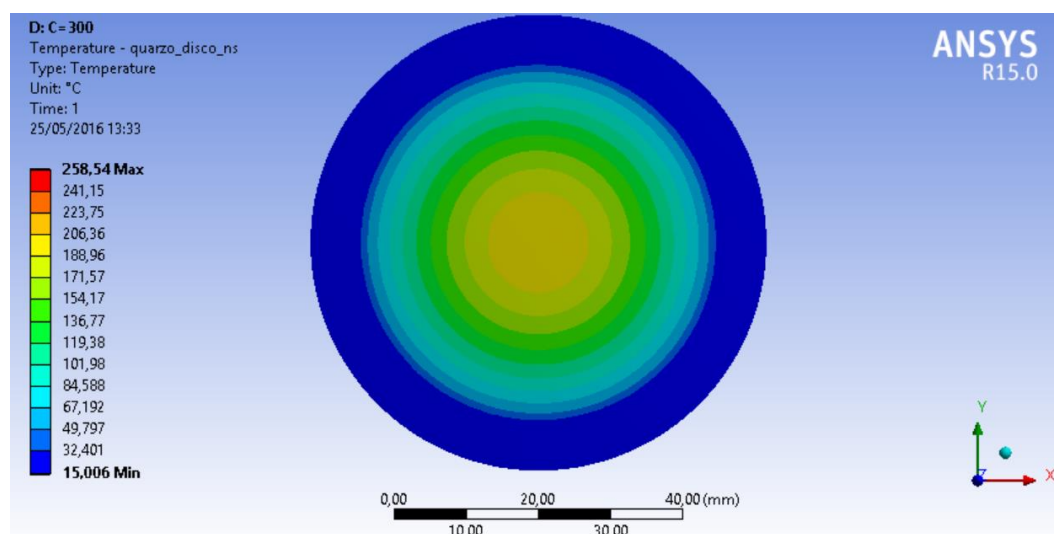
**Figura 7. 206** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=300 soli



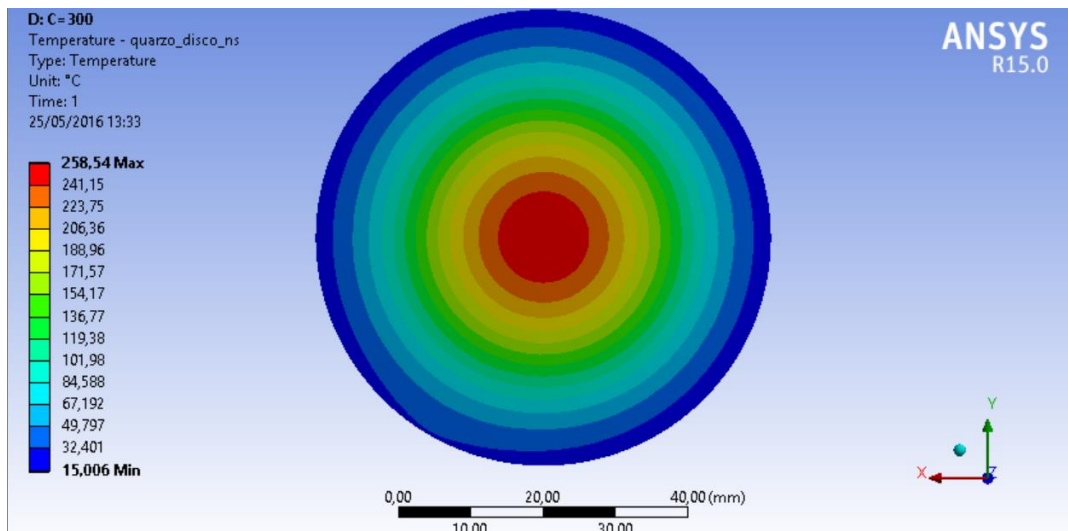
**Figura 7. 207** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=300 soli



**Figura 7. 208** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=300 soli



**Figura 7. 209** Distribuzione della temperatura sul lato esterno della finestra per C=300 soli



**Figura 7. 210** Andamento della temperatura sul lato interno della finestra per C=300 soli

In questa immagine a causa dell'ampio range di temperatura non è apprezzabile la distribuzione di temperatura nel collettore e nel modulo termoelettrico, benché si possa già notare una zona di riscaldamento nel collettore all'interfaccia con il distanziatore.

Come si può notare in Figura 7. 205 e Figura 7. 206, che rappresenta l'andamento della temperatura nell'assorbitore-emettitore, la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera Figura 7. 205 e nella zona di contatto con i distanziatori Figura 7. 206.

Nel collettore, Figura 7. 207, si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. I flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. Il lato posteriore del collettore si porta ad una temperatura omogenea e pari a 222 °C. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 217 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sulla lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 60°C.

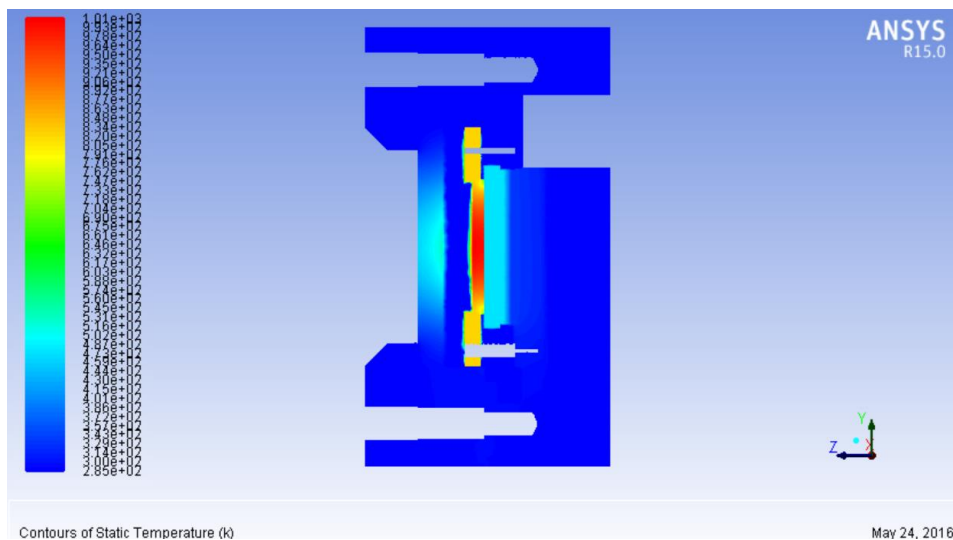
La finestra, Figura 7. 209 e Figura 7. 210, raggiunge la massima temperatura, pari a 258,5 °C. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 206 °C inferiore rispetto a quella raggiunta sull'altro lato, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

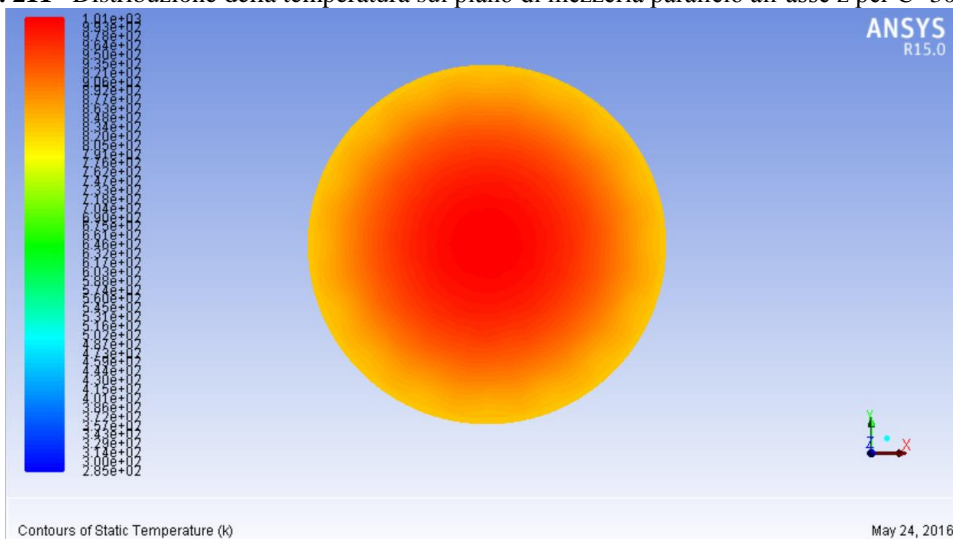
In Figura 7. 211 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 212 e Figura 7. 213, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 734,2 °C, è leggermente inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 236 °C.

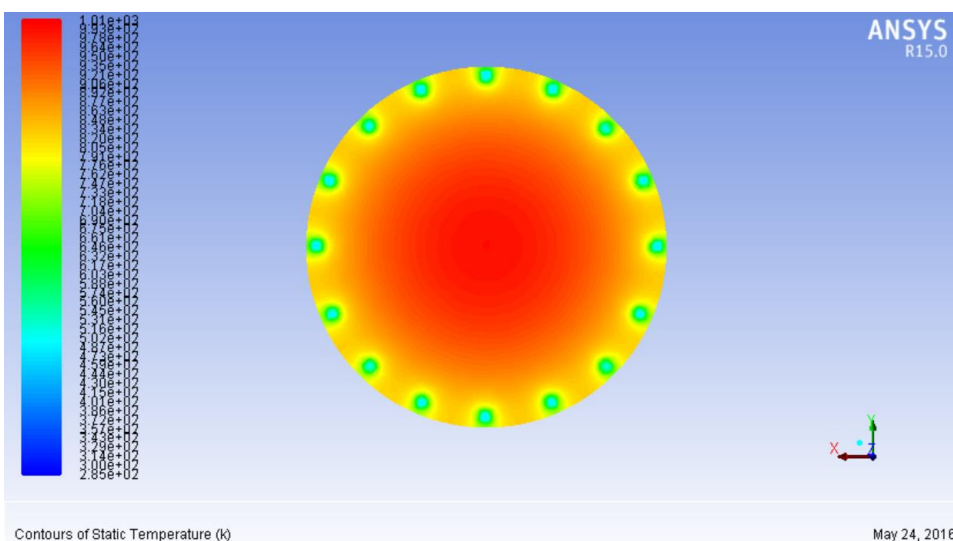
Il collettore, Figura 7. 214, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 231 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 195 °C.



**Figura 7. 211** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=300 soli



**Figura 7. 212** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=300 soli

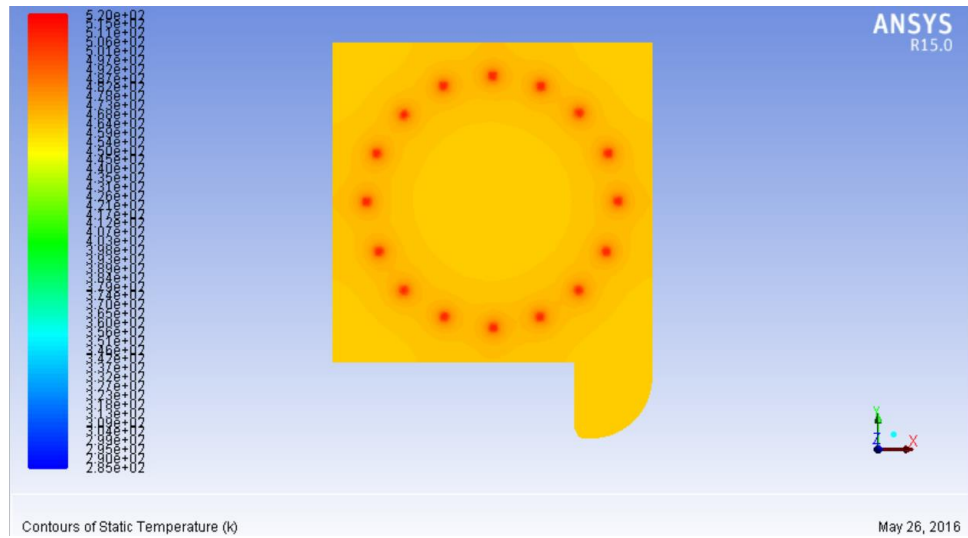


**Figura 7. 213** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=300 soli

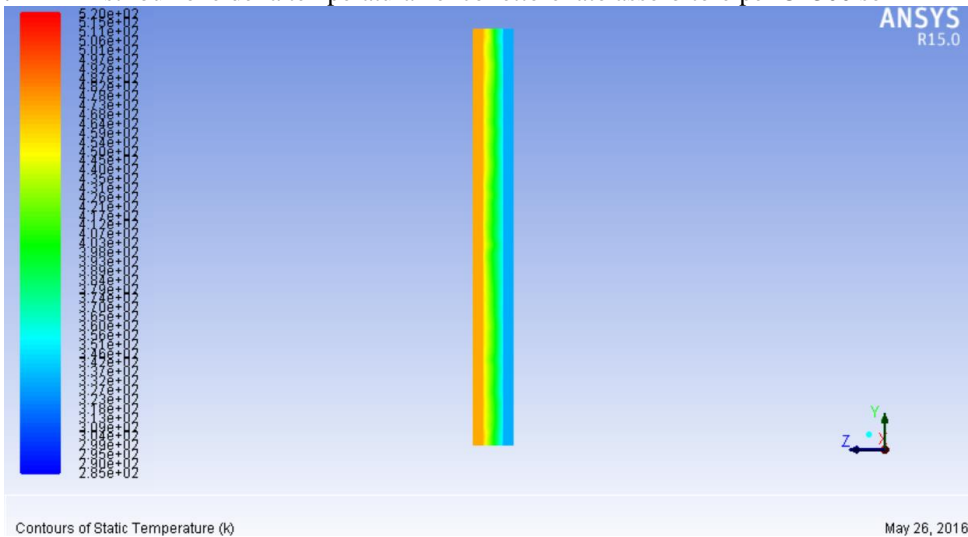
In Figura 7. 215 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 187 °C mentre il lato freddo 50 °C. Le



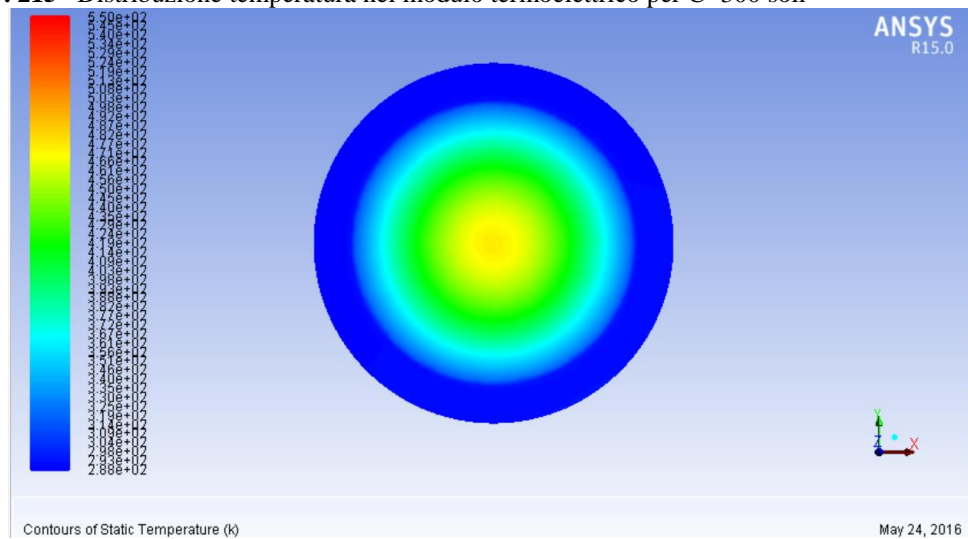
temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.



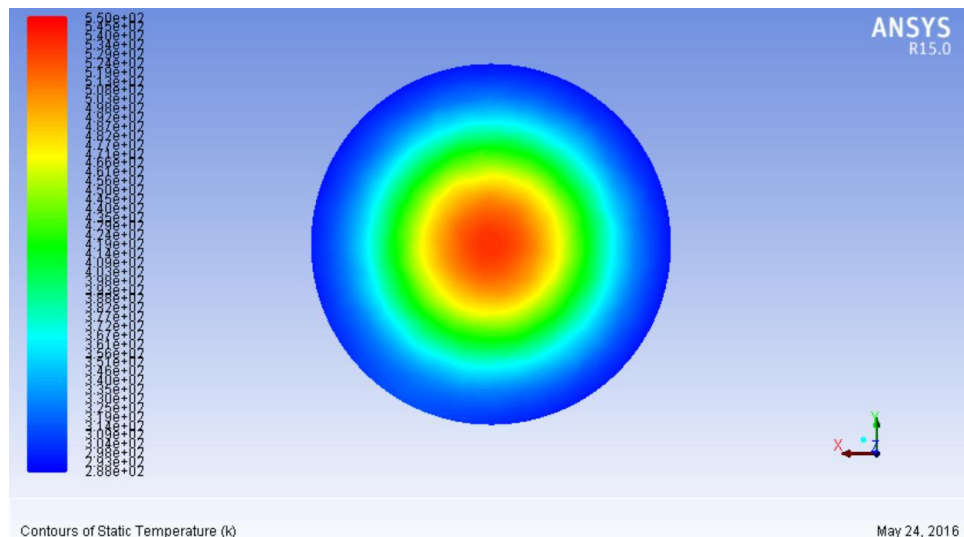
**Figura 7. 214** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=300$  soli



**Figura 7. 215** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=300$  soli



**Figura 7. 216** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per  $C=300$  soli



**Figura 7. 217** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=300 soli

La temperatura nella finestra, Figura 7. 216 e Figura 7. 217, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 247°C contro i 258,5 °C della simulazione con Steady State. Questo è dovuto alla minor temperatura raggiunta nell'assorbitore e alla presenza dell'acqua nel dissipatore.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 245 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 22,25 W, di cui 2,36 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 19 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 0,76 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 222 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 157 W di cui 154,5 W sono scambiati per conduzione e 2,18 W per irraggiamento e 0,34 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 30 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,24 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 126,78 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

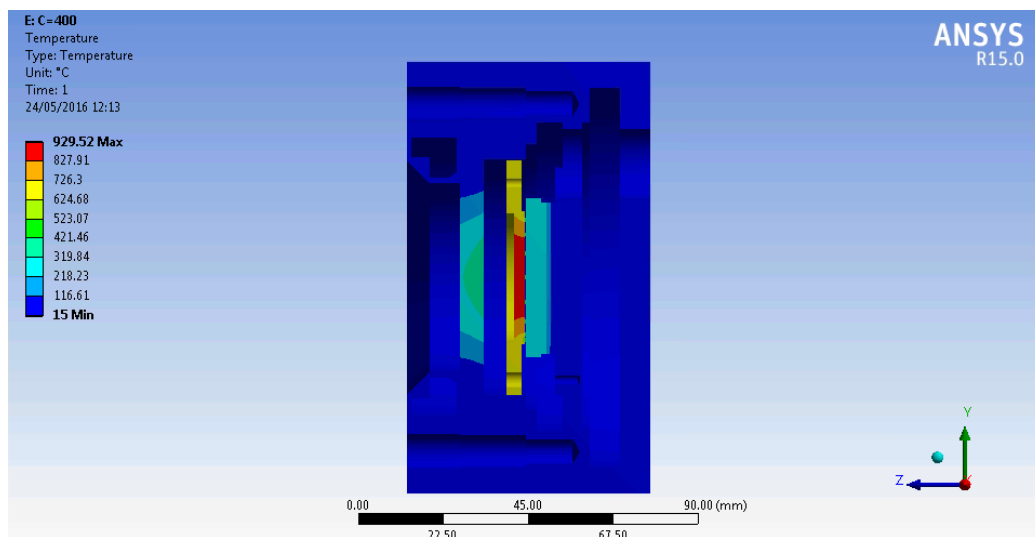
La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 126,78 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 6,3 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,15 W. la restante potenza, 120,3 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 21,2 W, di cui 11,1 W vengono scambiati con il dissipatore, 4,68 W per conduzione con la flangia e 5,4 per convezione con l'esterno.

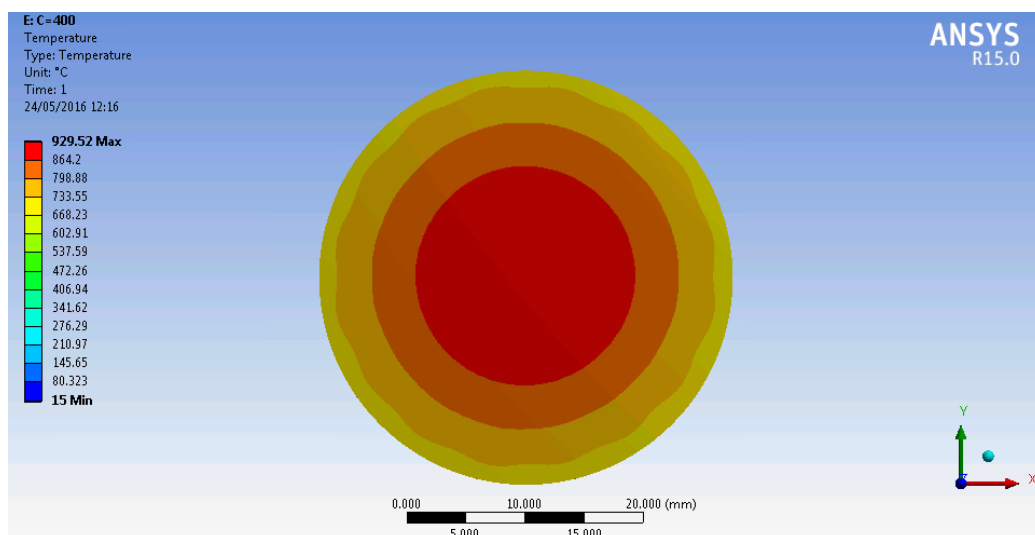
Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 400 soli.

In Figura 7. 218 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. I valori di temperatura sono riportati in °C. Si fa sempre riferimento a Figura 7. 1.

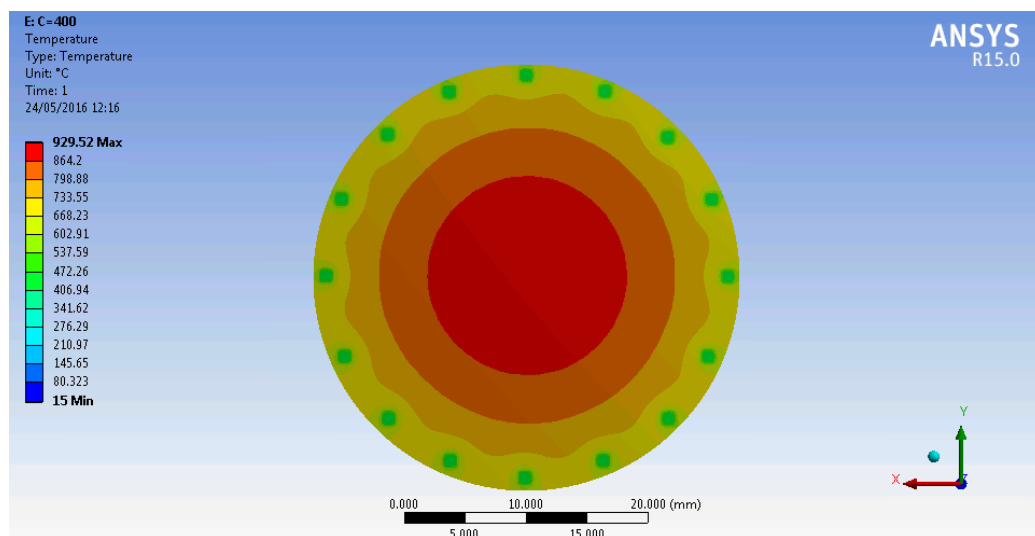




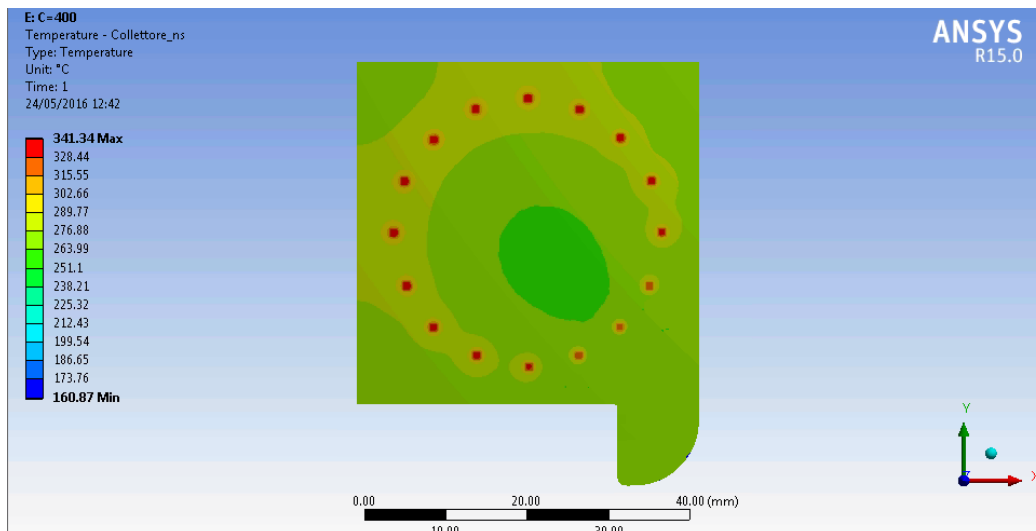
**Figura 7. 218** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli



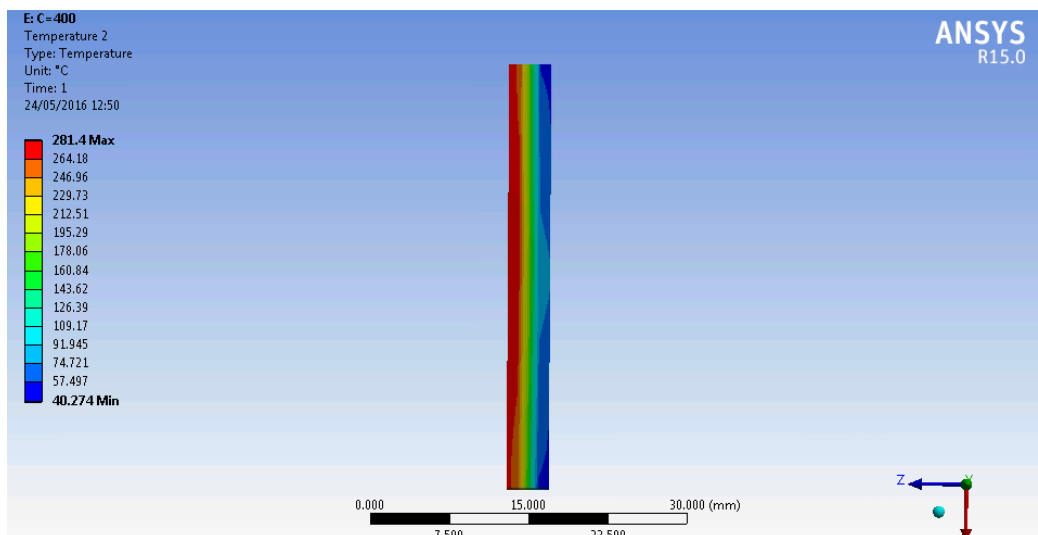
**Figura 7. 219** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=400 soli



**Figura 7. 220** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=400 soli



**Figura 7. 221** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=400 soli



**Figura 7. 222** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=400 soli

La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 929,5 °C, tale valore è superiore rispetto a quello ottenuto nei casi con anello distanziatore da 10 µm e 100 µm. La minore area di contatto comporta una minore perdita attraverso i distanziatori rispetto ai casi sopra citati.

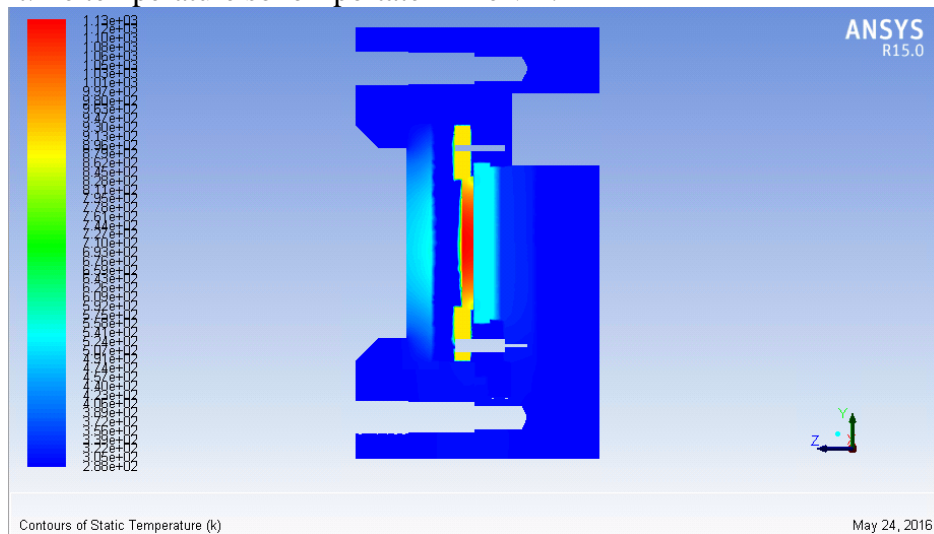
In questa immagine a causa dell'ampio range di temperatura non è apprezzabile la distribuzione di temperatura nel collettore e nel modulo termoelettrico, benché si possa già notare una zona di riscaldamento nel collettore all'interfaccia con il distanziatore.

Come si può notare Figura 7. 219, la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera Figura 7. 219 e nella zona di contatto con i distanziatori Figura 7. 220.

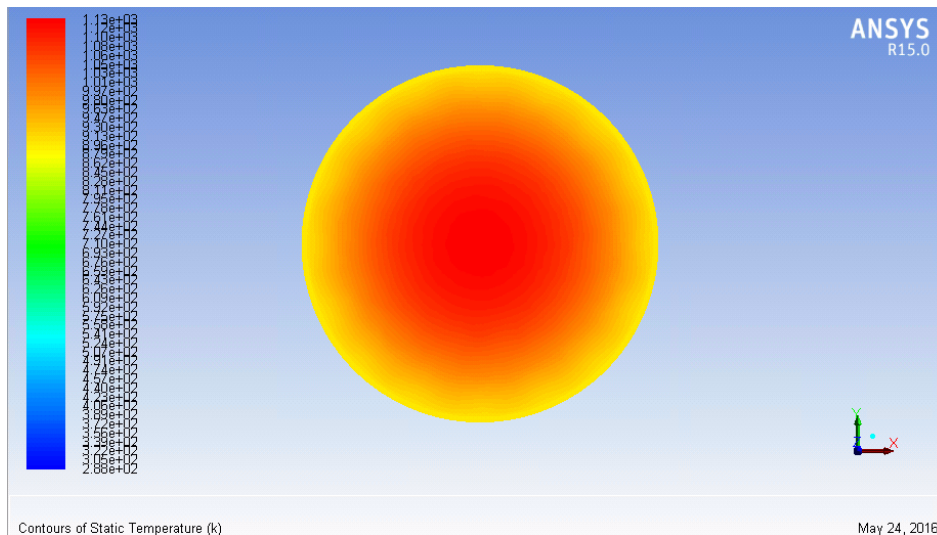
Nel collettore, Figura 7. 221, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Anche in questo caso i flussi di calore scambiati per conduzione sono maggiori rispetto a quelli scambiati per irraggiamento, da qui la presenza di una zona centrale più fredda rispetto a quella vicina al distanziatore. Il lato posteriore del collettore si porta ad una temperatura omogenea e pari a 278 °C. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .

Il lato caldo del modulo termoelettrico, si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 270 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 75°C. La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 209 e Figura 7. 210, ma in un range di temperatura compreso tra 401,27 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 320 °C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



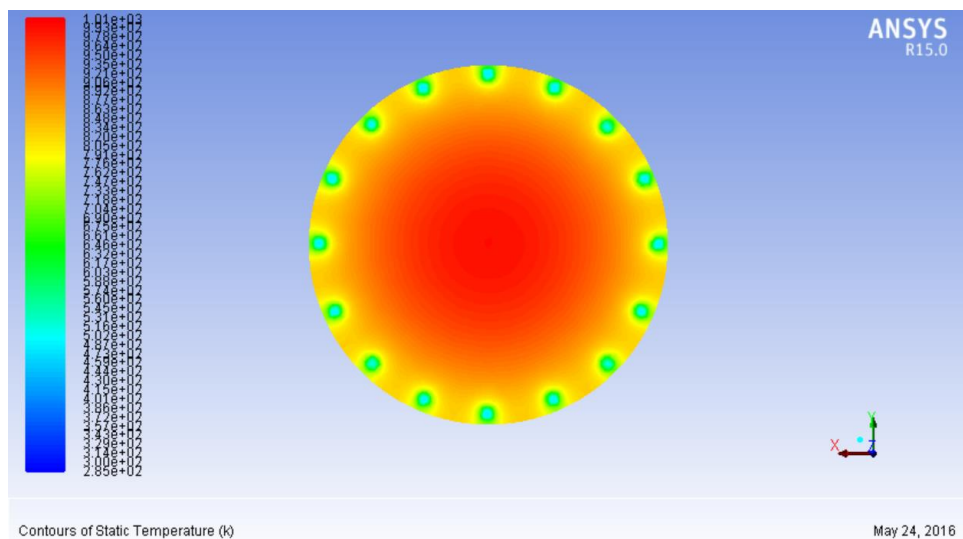
**Figura 7. 223** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=400 soli



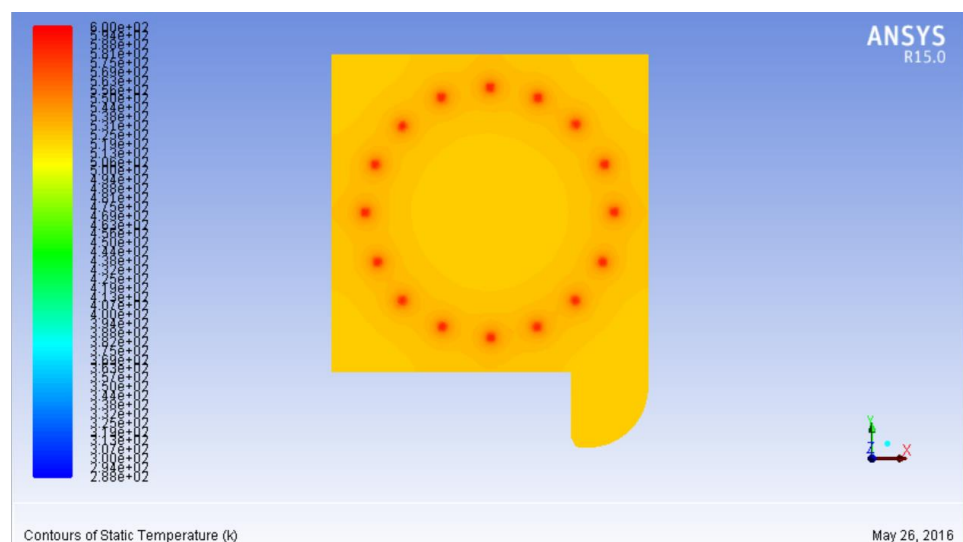
**Figura 7. 224** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=400 soli

In Figura 7. 223 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

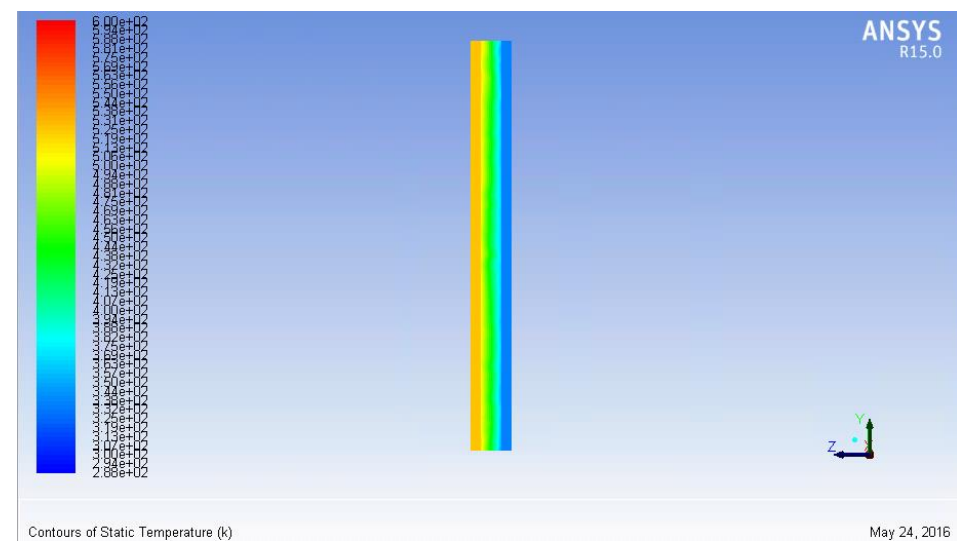
L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 224 e Figura 7. 225, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 856 °C, è inferiore. La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 273°C.



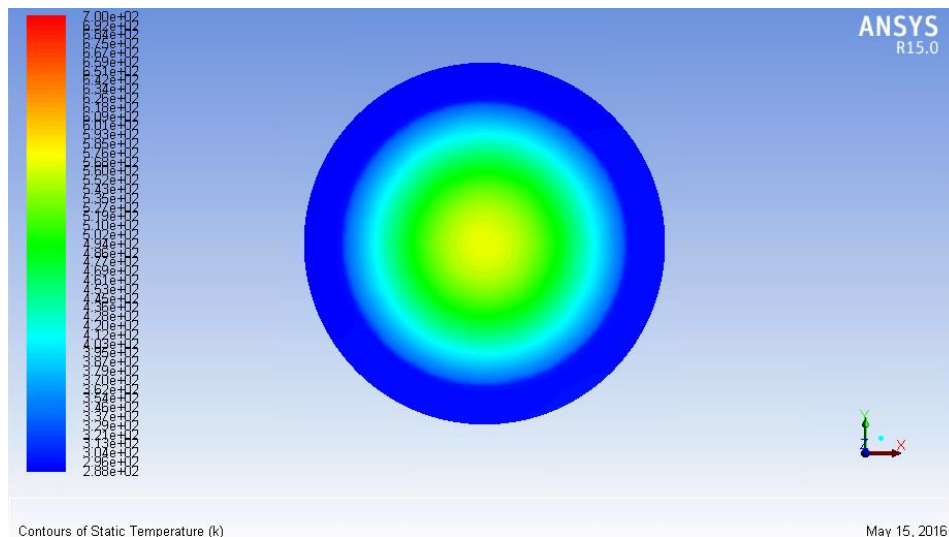
**Figura 7. 225** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=400$  soli



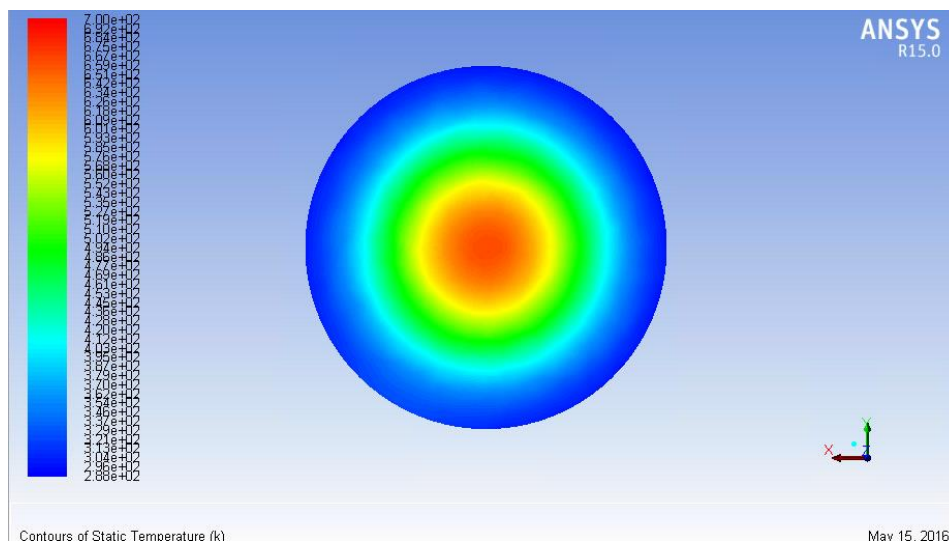
**Figura 7. 226** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=400$  soli



**Figura 7. 227** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=400$  soli



**Figura 7. 228** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=400 soli



**Figura 7. 229** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=400 soli

Il collettore, Figura 7. 226, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 265 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 240 °C.

In Figura 7. 227 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 221 °C mentre il lato freddo 65 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 228 e Figura 7. 229, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 352°C.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 326 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 32,26 W, di cui 3,5 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 27,9 W vengono scambiati con la

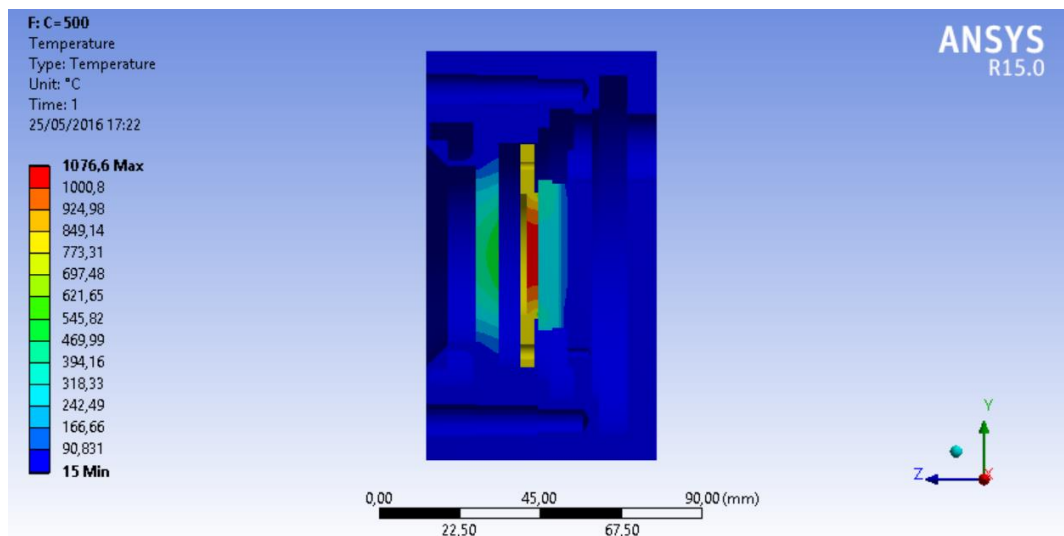
finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 6,3 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 287,6 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 198 W di cui 192 W sono scambiati per conduzione e 3,14 W per irraggiamento e 2,8 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 37 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,29 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 160,65 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 160,65 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 8,03 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,2 W. la restante potenza, 152 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 28 W, di cui 15,3 W vengono scambiati con il dissipatore, 8,4 W per conduzione con la flangia e 4,3 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 500 soli.



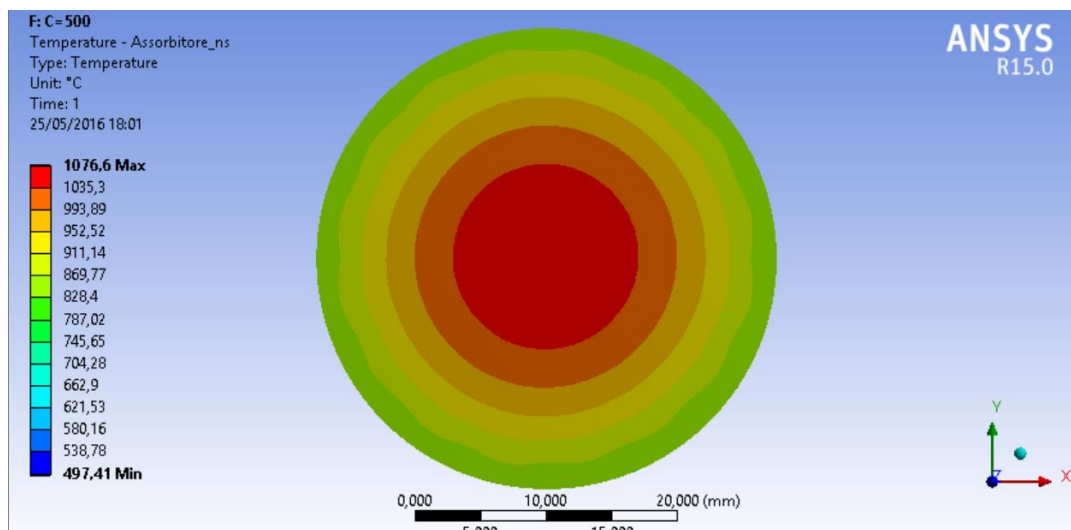
**Figura 7. 230** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=500 soli

In Figura 7. 230 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1076 °C, tale valore è superiore rispetto a quello ottenuto nei casi con anello distanziatore da 10 µm e 100 µm. La minore area di contatto comporta una minore perdita attraverso i distanziatori rispetto ai casi sopra citati.

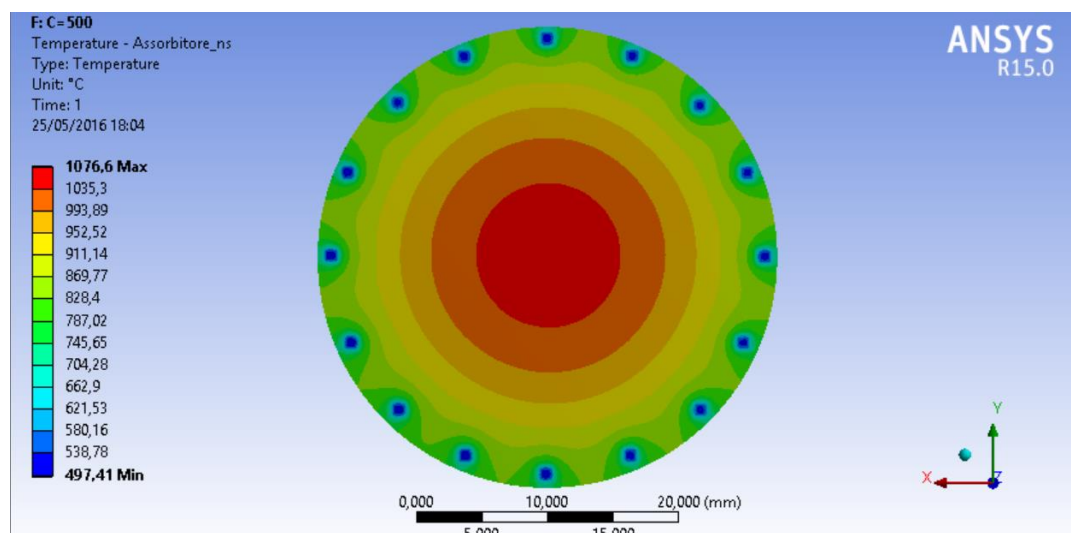
Come si può notare in Figura 7. 231 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore disperde più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera e nella zona di contatto con i distanziatori Figura 7. 232.

Nel collettore, Figura 7. 233, si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Il lato posteriore del collettore si porta ad una temperatura omogenea pari a 325°C. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .

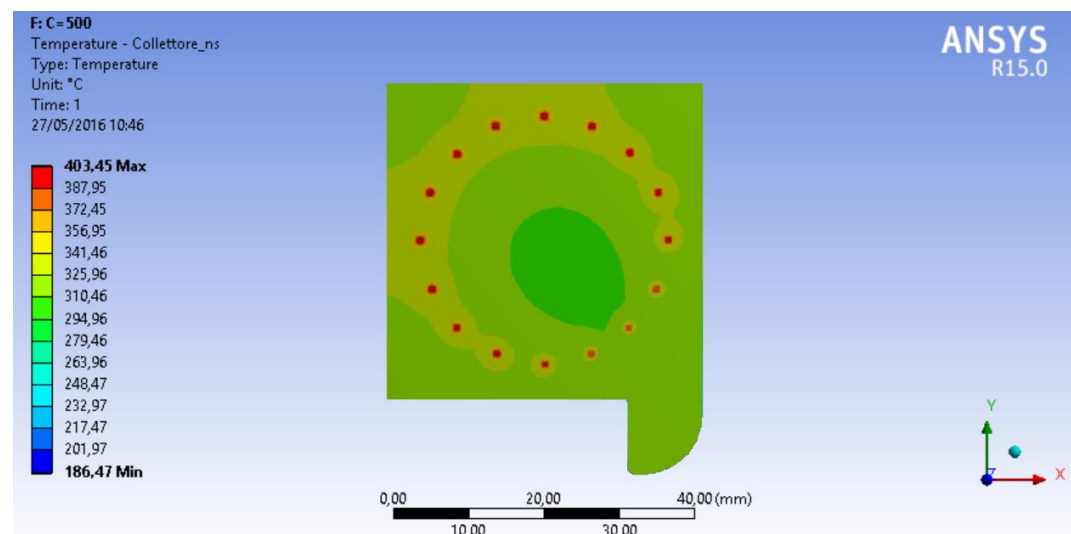




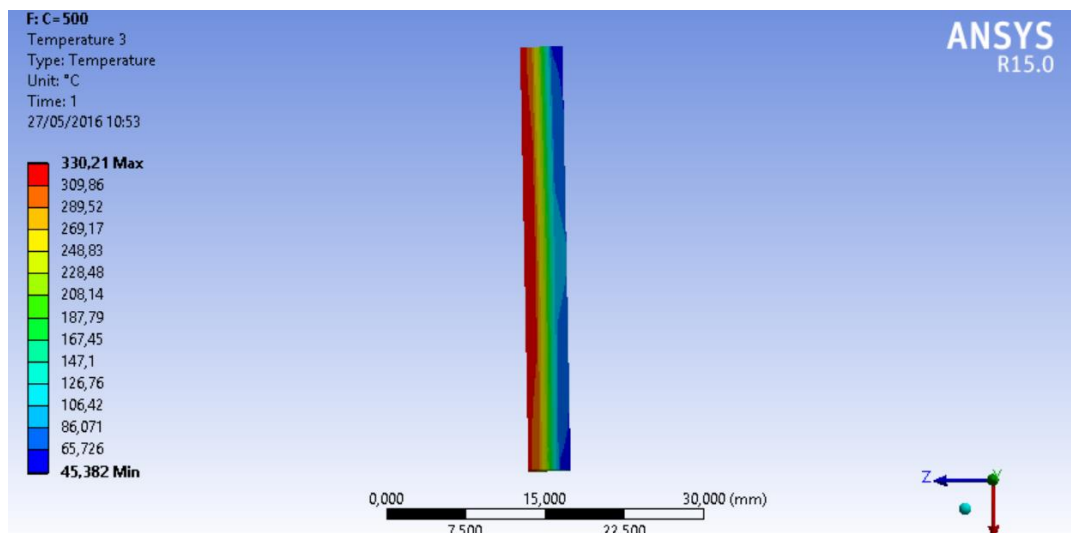
**Figura 7. 231** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=500 soli



**Figura 7. 232** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=500 soli



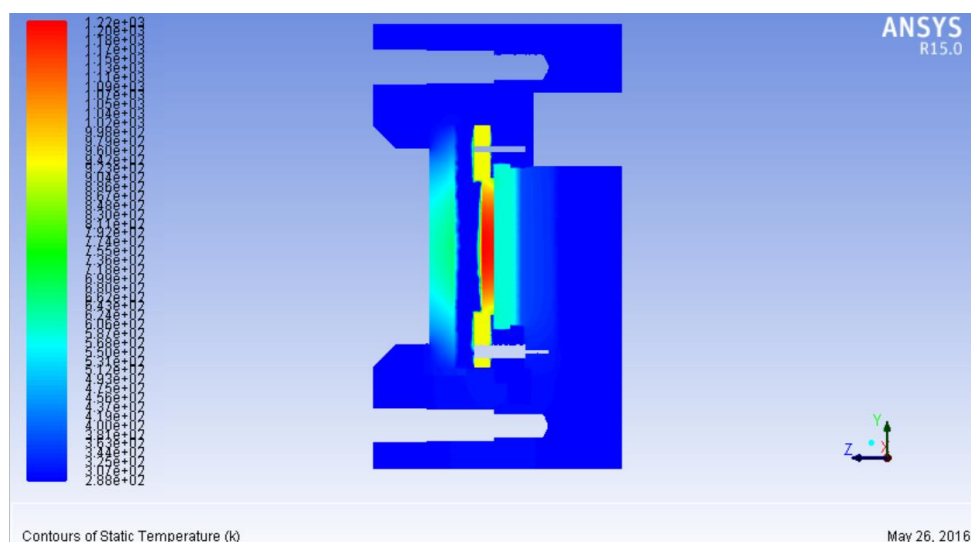
**Figura 7. 233** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=500 soli



**Figura 7. 234** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 310 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 90°C. La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 209 e Figura 7. 210, ma in un range di temperatura compreso tra 556,78 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 450°C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



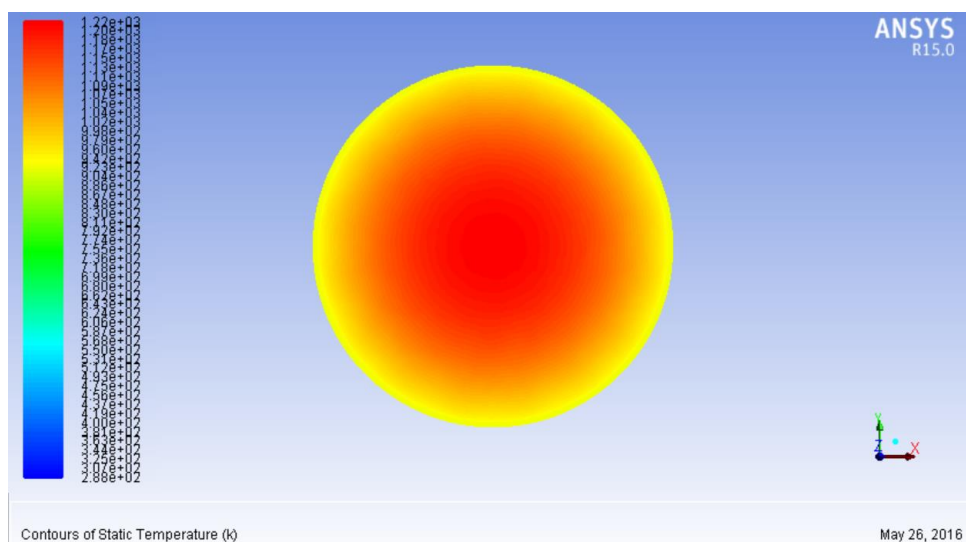
**Figura 7. 235** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzzeria parallelo all'asse z per C=500 soli

In Figura 7. 235 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

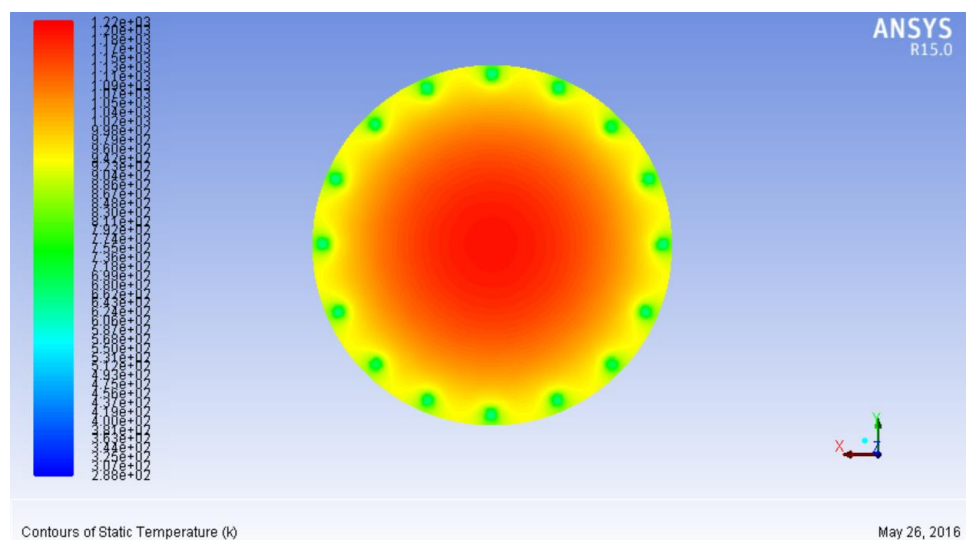
L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 236 e Figura 7. 237, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 947 °C, è inferiore. La



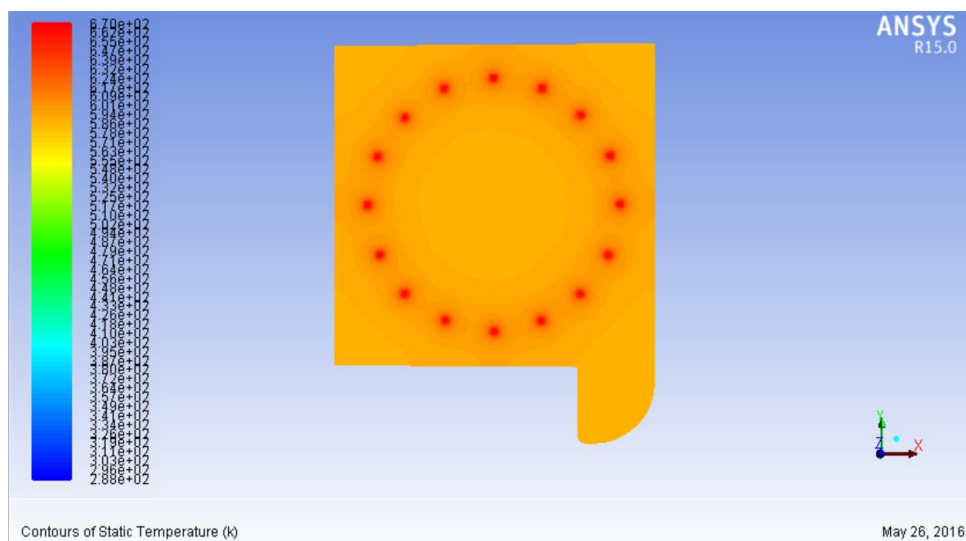
temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a  $357^{\circ}\text{C}$ .



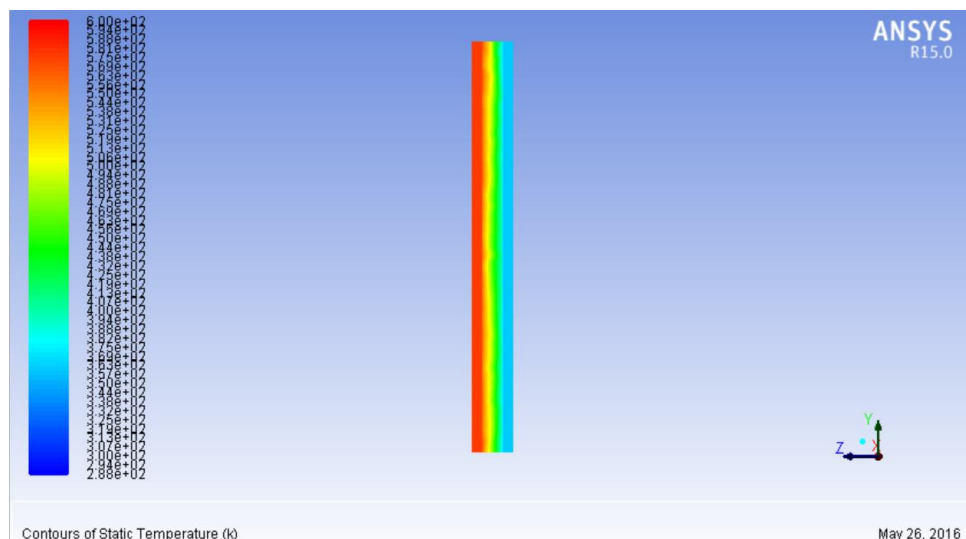
**Figura 7. 236** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per  $C=500$  soli



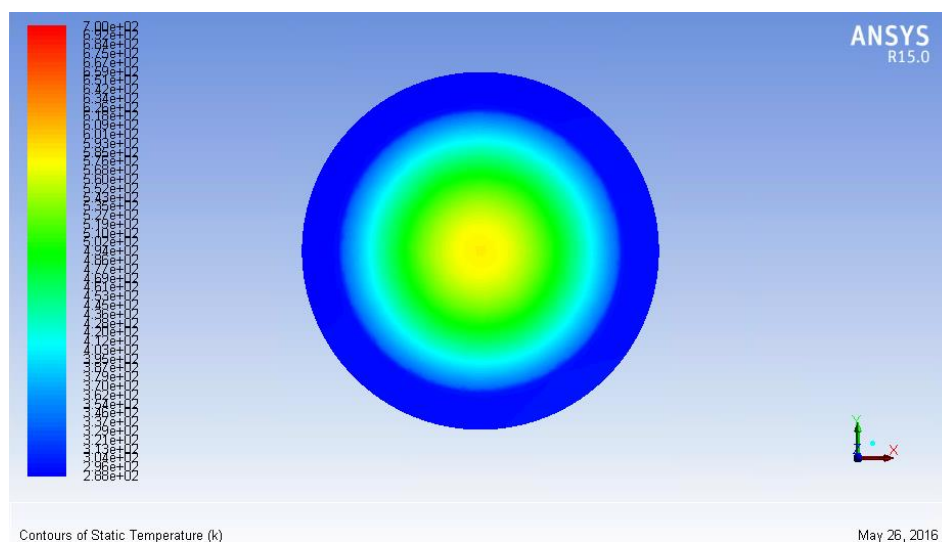
**Figura 7. 237** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per  $C=500$  soli



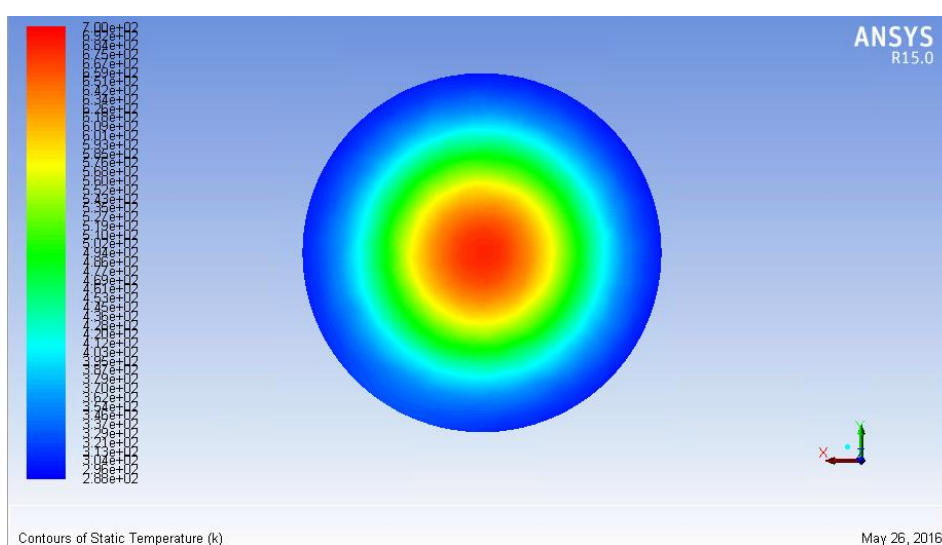
**Figura 7. 238** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=500$  soli



**Figura 7. 239** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=500 soli



**Figura 7. 240** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=500 soli



**Figura 7. 241** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=500 soli

Il collettore, Figura 7. 238, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 344 °C. Sul lato di interfaccia

con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 301 °C.

In Figura 7. 239 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 282 °C mentre il lato freddo 72 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 240 e Figura 7. 241, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 456°C.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 408 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 38,2 W, di cui 4 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 32 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 39 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 330,81 W.

Nel collettore la potenza entrante è pari a 279,75 W di cui 220,1 W sono scambiati per conduzione e 3,56 W per irraggiamento e 17,9 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 46,57 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,31 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 194,7 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 94,7 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 9,74 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,42 W. la restante potenza, 184,6 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 34 W, di cui 16 W vengono scambiati con il dissipatore, 9,6 W per conduzione con la flangia e 8,4 per convezione con l'esterno.

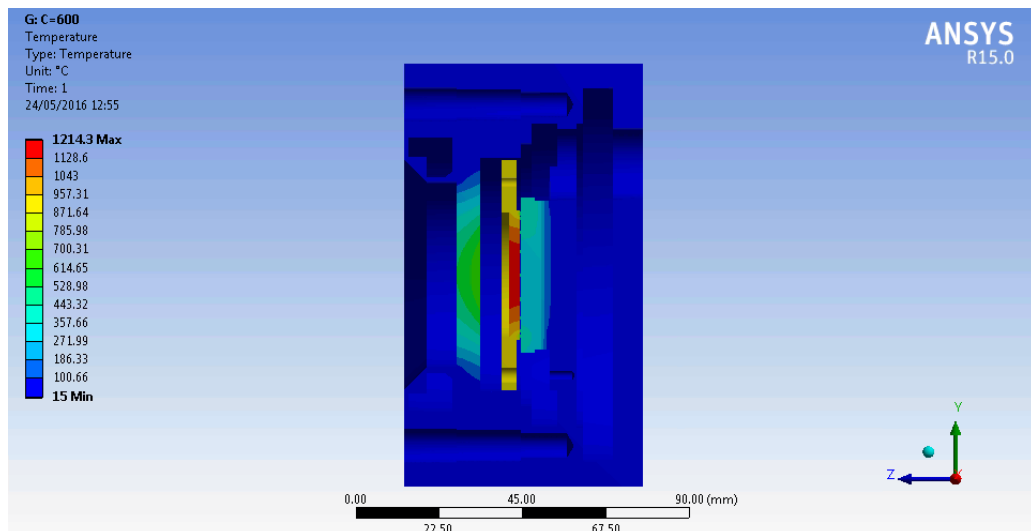
Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 600 soli.

In Figura 7. 242 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1214 °C, tale valore è superiore rispetto a quello ottenuto nei casi con anello distanziatore da 10 µm e 100 µm. La minore area di contatto comporta una minore perdita attraverso i distanziatori rispetto ai casi sopra citati.

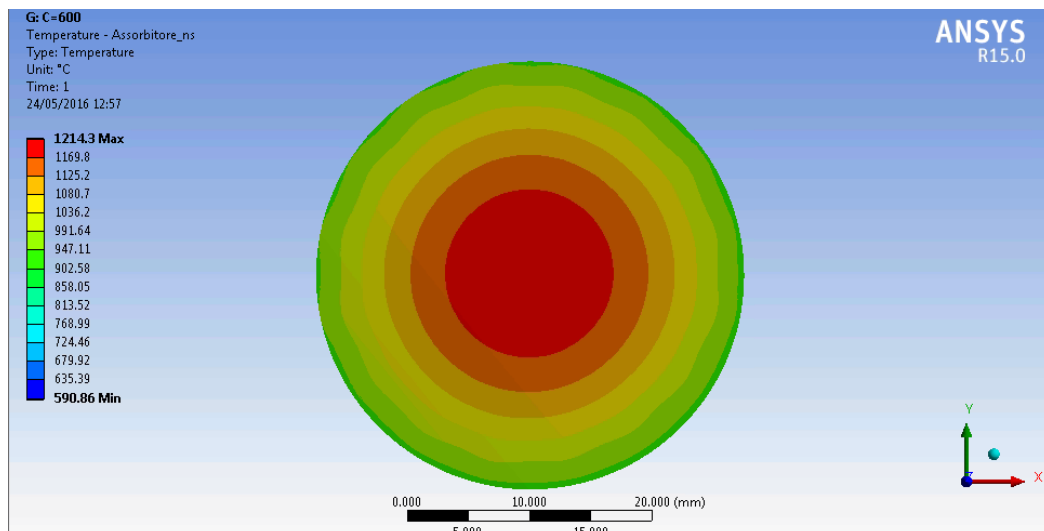
Come si può notare in Figura 7. 243 la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante. L'assorbitore dissipa calore più per conduzione che per irraggiamento come si può notare dall'abbassamento di temperatura nella zona di contatto con la ghiera Figura 7. 243 e nella zona di contatto con i distanziatori Figura 7. 244.

Nel collettore, Figura 7. 245, si può notare una zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Il lato posteriore del collettore si porta ad una temperatura omogenea e pari a

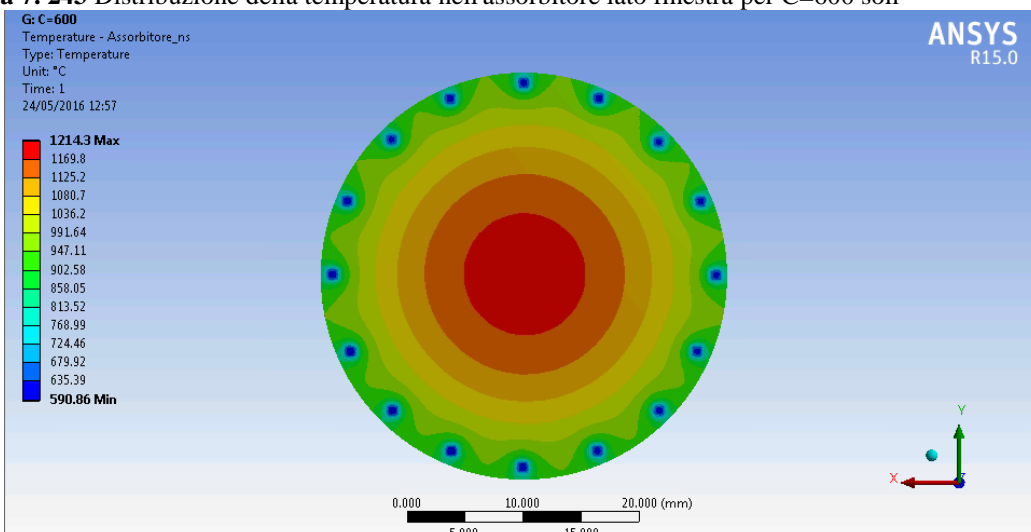
353°C. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la Flangia di supporto per la finestra .



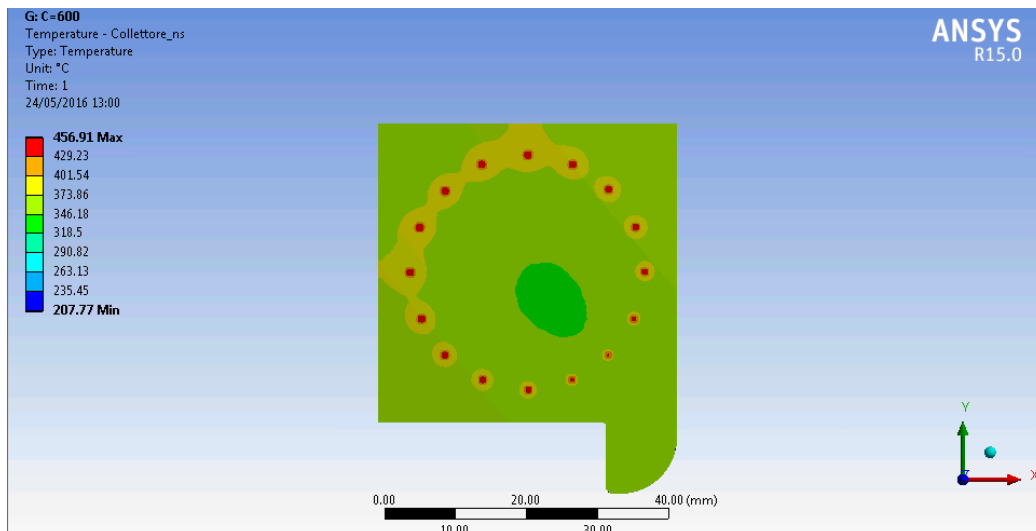
**Figura 7. 242** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli



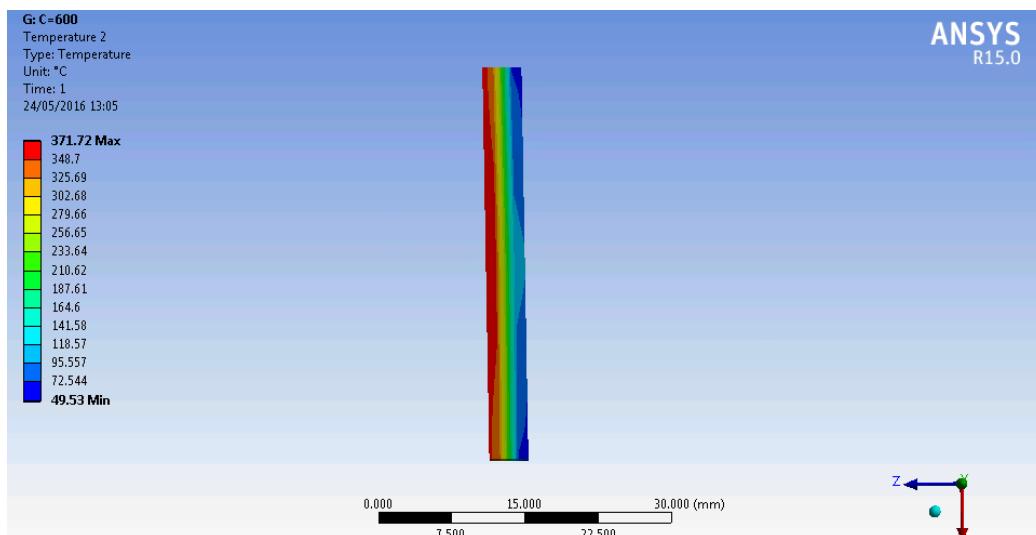
**Figura 7. 243** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=600 soli



**Figura 7. 244** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=600 soli



**Figura 7. 245** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=600 soli



**Figura 7. 246** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=600 soli

Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 340 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 115°C.

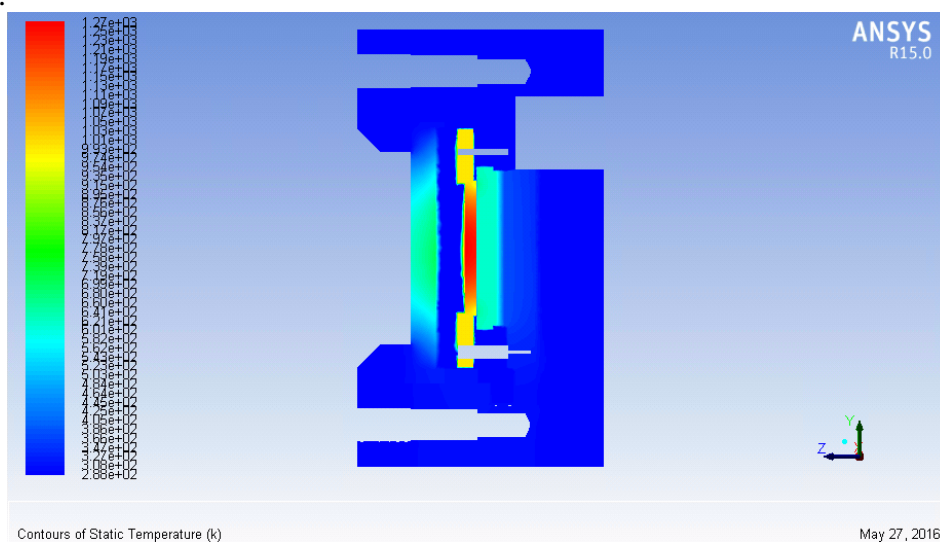
La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 209 e Figura 7. 210, ma in un range di temperatura compreso tra 699,72 °C e 15 °C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 523°C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.

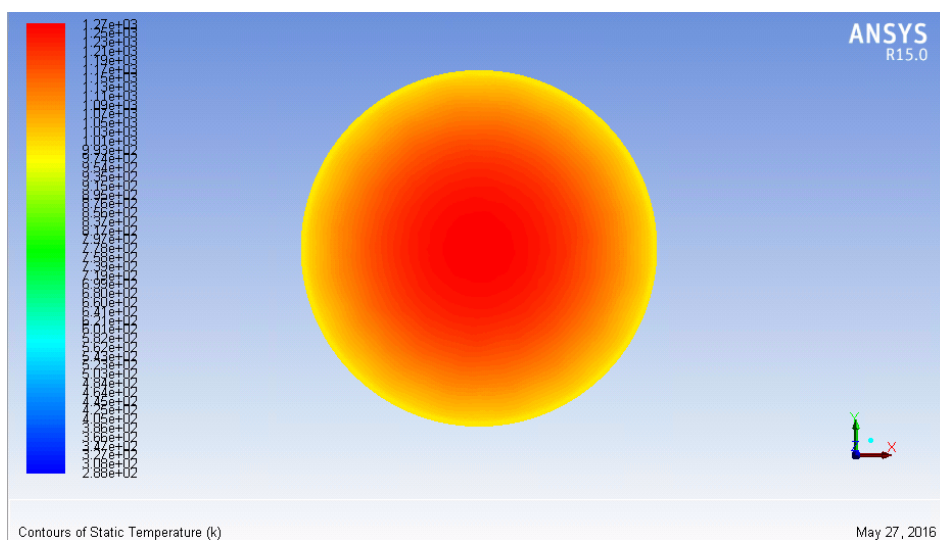
In Figura 7. 247 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

La distribuzione della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 248 e Figura 7. 249, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 994,4 °C, è inferiore.

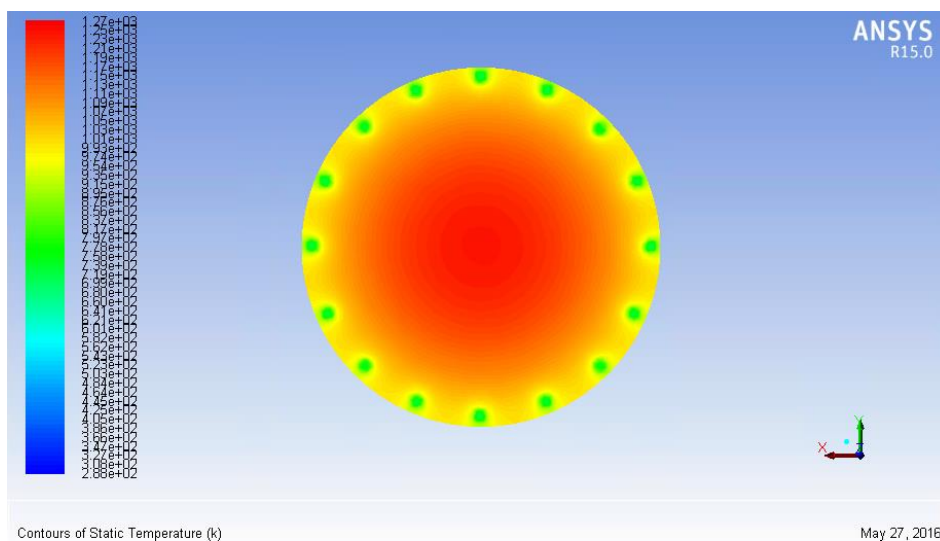
La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 390°C.



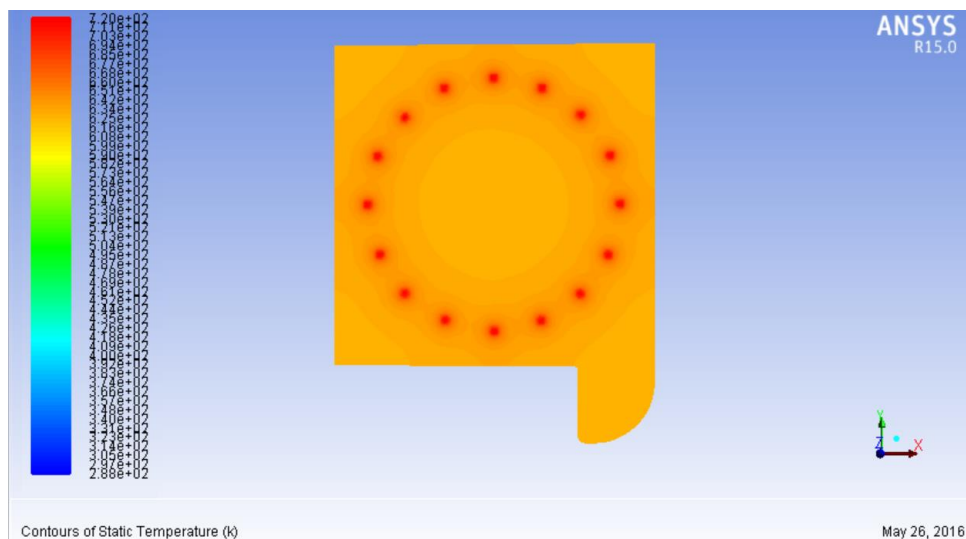
**Figura 7. 247** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=600 soli



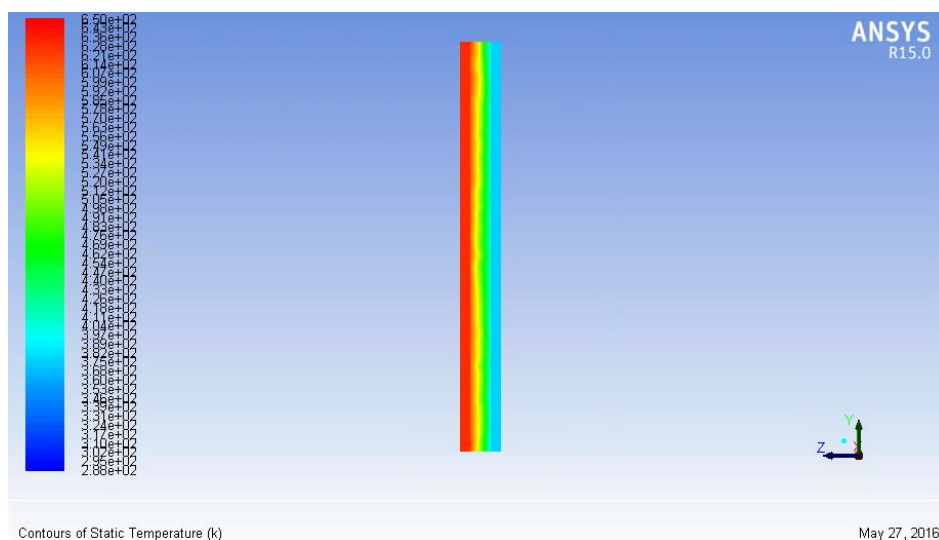
**Figura 7. 248** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=600 soli



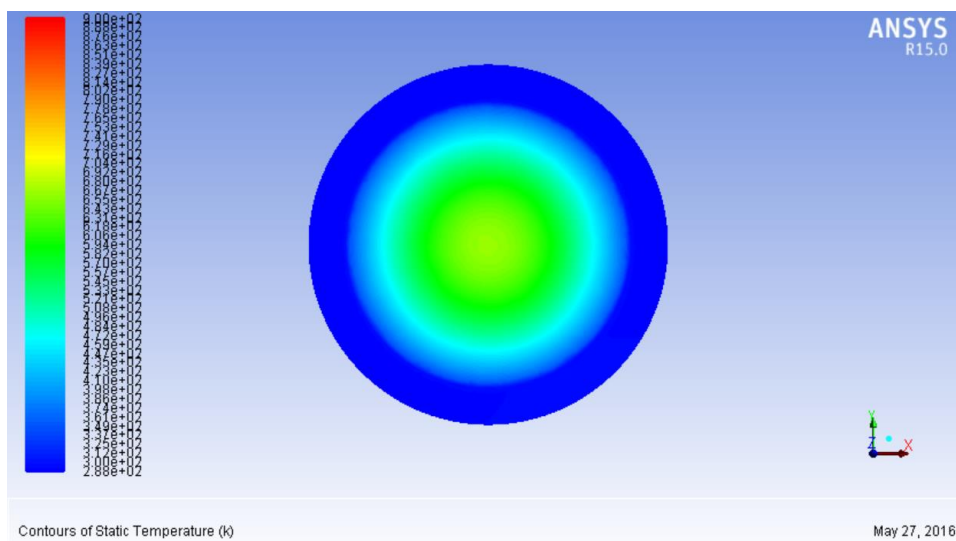
**Figura 7. 249** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=600 soli



**Figura 7. 250** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per  $C=600$  soli

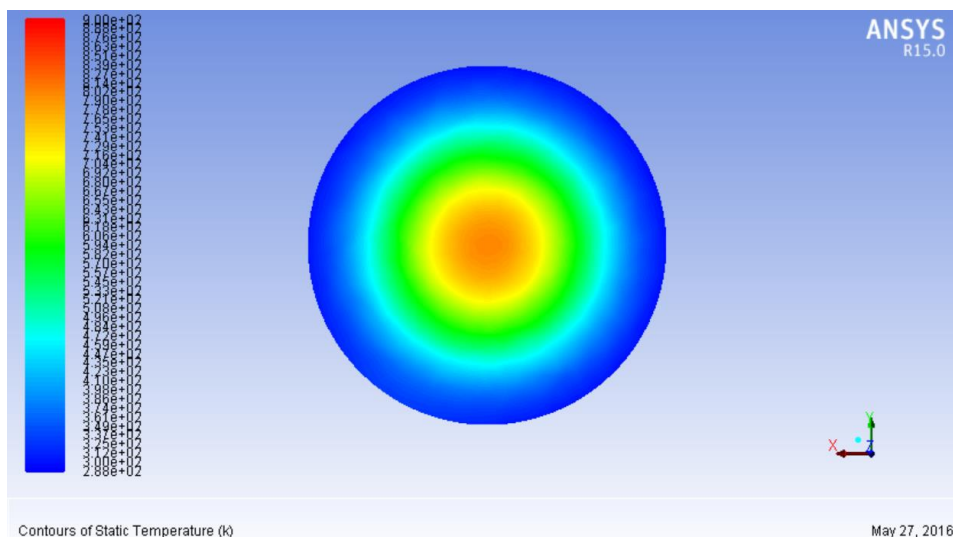


**Figura 7. 251** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per  $C=600$  soli



**Figura 7. 252** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per  $C= 600$  soli





**Figura 7. 253** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=600 soli

Il collettore, Figura 7. 250, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 379 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 347°C. In Figura 7. 251 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 339 °C mentre il lato freddo 103 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 252 e Figura 7. 253 ,rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 492°C.

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 490 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 52,3 W, di cui 5,4 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 44,9 W vengono scambiati con la finestra. La potenza relativa al flusso termoionico è pari a 100 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 337,7 W.

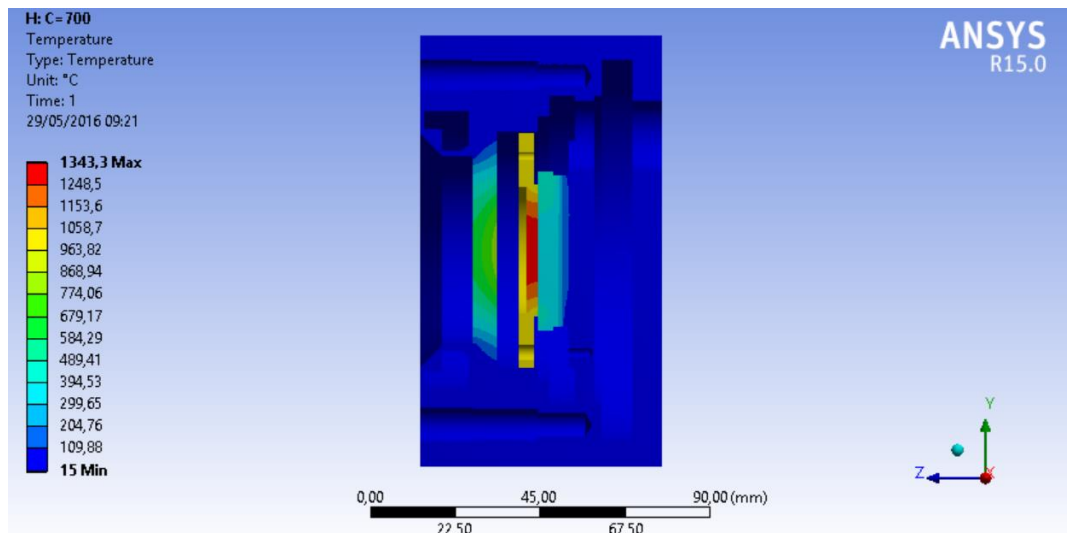
Nel collettore la potenza entrante è pari a 270,86 W di cui 217 W sono scambiati per conduzione e 4,86 W per irraggiamento e 49 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 52,7 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra , 0,42 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 217,89 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 217,89 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 11 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,48 W. la restante potenza, 206,41 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

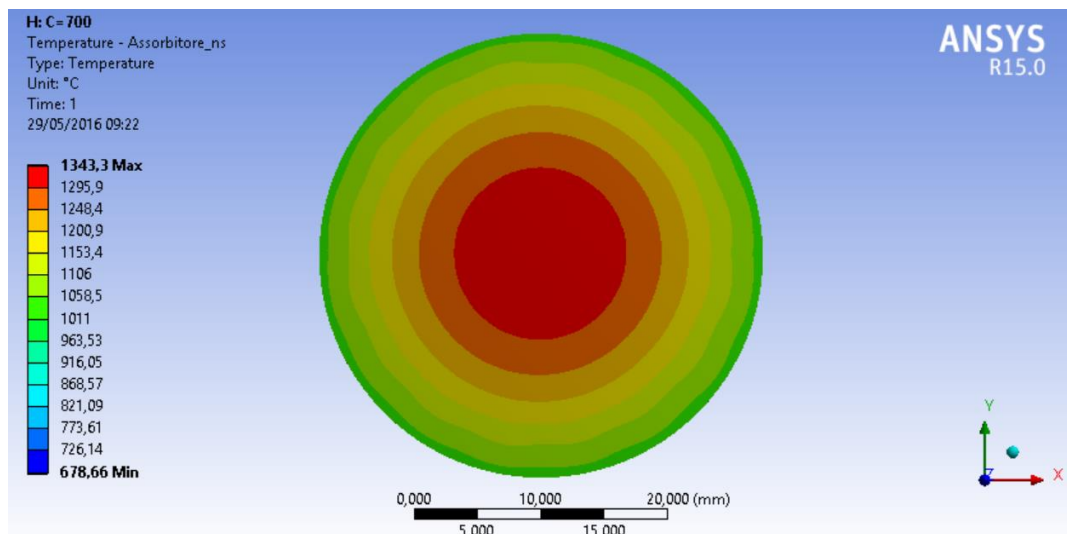


Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 45,1 W, di cui 23,2 W vengono scambiati con il dissipatore, 13,6 W per conduzione con la flangia e 8,3 per convezione con l'esterno.

Si affronta il caso con fattore di concentrazione pari a 700 soli.



**Figura 7. 254** Distribuzione delle temperature sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli



**Figura 7. 255** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato finestra per C=700 soli

In Figura 7. 254 si può osservare l'andamento delle temperature in un piano di sezione dispositivo di conversione. La temperatura massima viene raggiunta nell'assorbitore-emettitore ed è pari a 1343,3 °C, tale valore è superiore rispetto a quello ottenuto nei casi con anello distanziatore da 10  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . La minore area di contatto comporta una minore perdita attraverso i distanziatori rispetto ai casi sopra citati.

In questa immagine, a causa dell'ampio range di temperatura, non è apprezzabile la distribuzione di temperatura nel collettore e nel modulo termoelettrico, benché si possa già notare una zona di riscaldamento nel collettore all'interfaccia con il distanziatore. Come si può notare in Figura 7. 255, la zona più calda è quella da cui viene assorbita la radiazione entrante.

Nel collettore (Figura 7. 256) si può notare un zona più calda nei pressi dell'interfaccia del distanziatore. Il lato posteriore del collettore si porta ad una temperatura omogenea pari a

410 °C. Si ritrova la zona di raffreddamento presente nell'orecchio del collettore dovuta al contatto di tale parte con la flangia di supporto per la finestra .

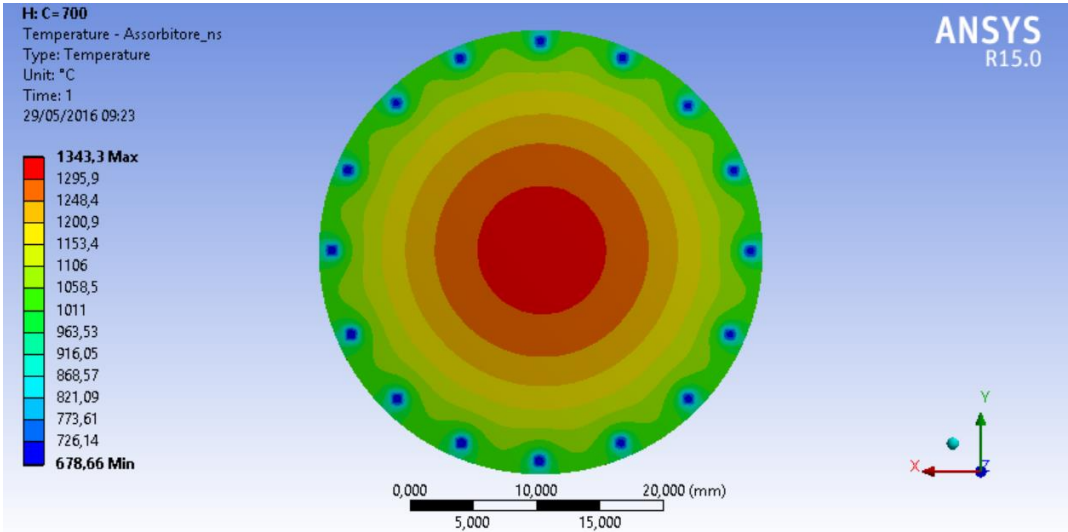


Figura 7. 256 Distribuzione della temperatura nell'assorbitore lato collettore per C=700 soli

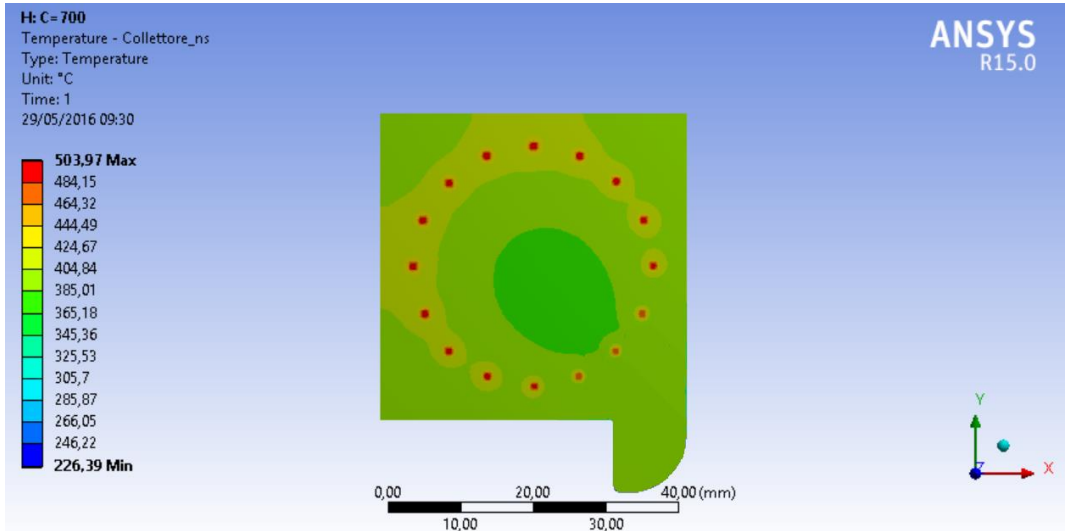


Figura 7. 257 Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli

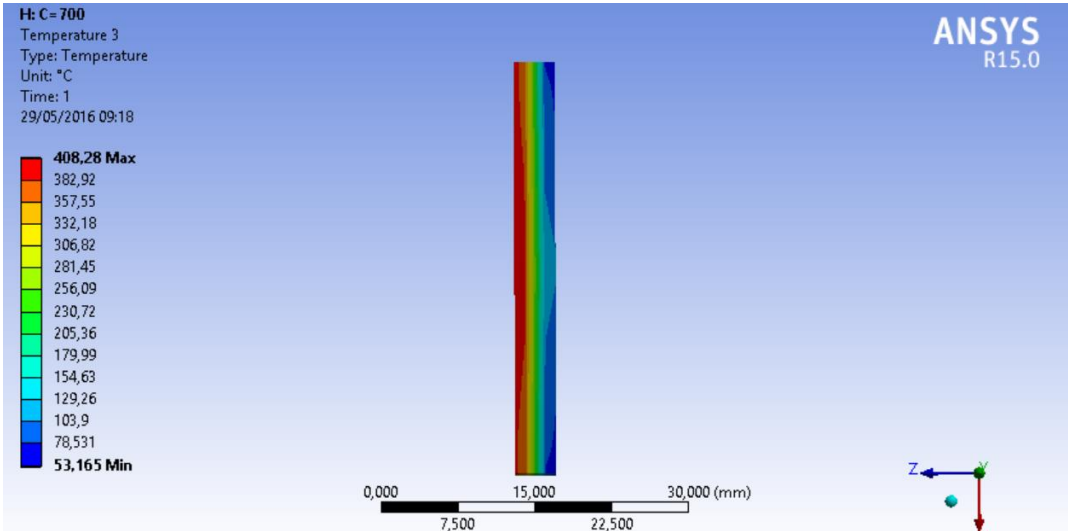
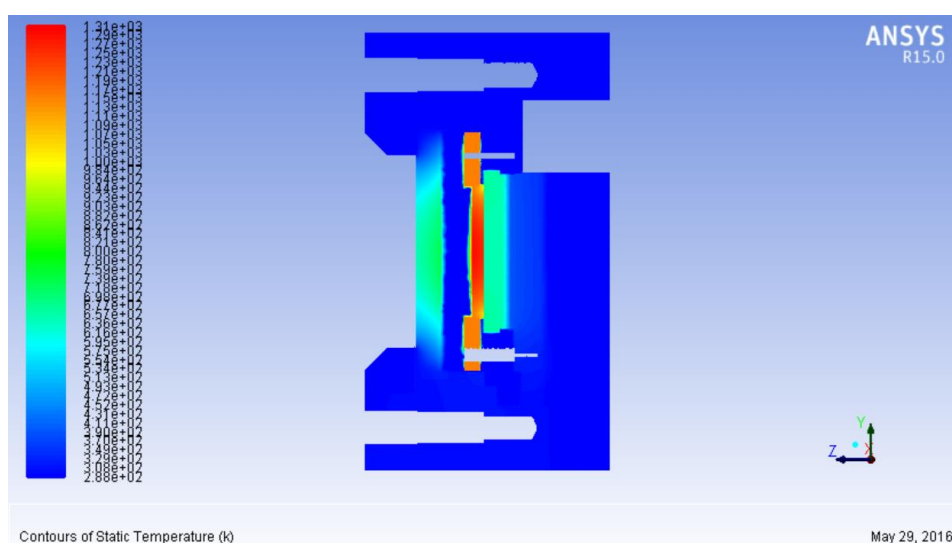


Figura 7. 258 Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli

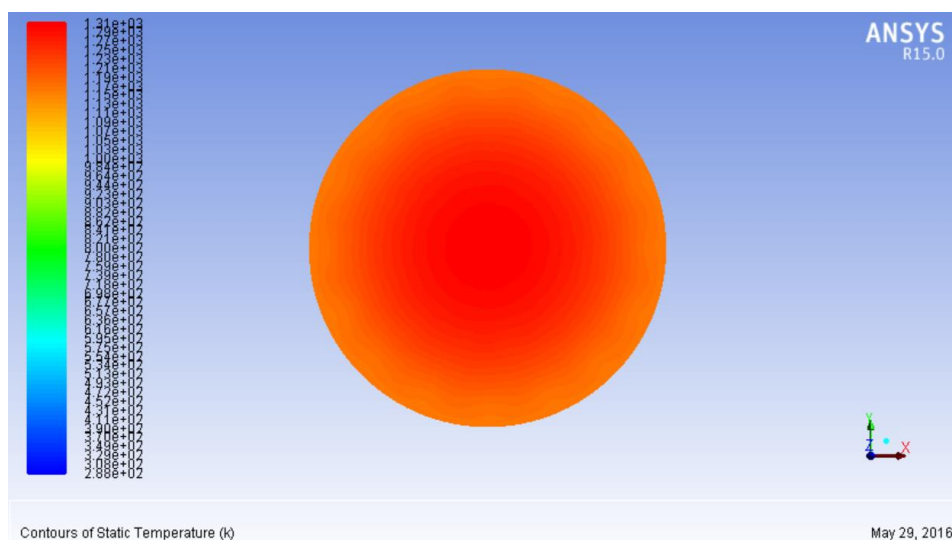
Il lato caldo del modulo termoelettrico si porta ad una temperatura circa omogenea sulla superficie di interfaccia con il collettore e pari a 392 °C. Il lato freddo invece si porta ad una temperatura circa omogenea sul lato di interfaccia con il corpo di flangia e pari a 120°C.

La distribuzione di temperatura della finestra si mantiene la medesima del caso con C=300 soli, Figura 7. 209 e Figura 7. 210, ma in un range di temperatura compreso tra 832,87 °C e 15°C. La temperatura massima è raggiunta sul lato interno al dispositivo dove scambia per irraggiamento con l'assorbitore e la ghiera di sostegno. Sul lato che interfaccia con l'esterno la temperatura massima raggiunta è circa 659°C, inferiore rispetto a quella raggiunta sul lato opposto, ciò è dovuto sia allo scambio con l'esterno per convezione che alla bassa conducibilità del quarzo.

Di seguito riportiamo le immagini relativi ai contours colorati con la temperatura ottenute con Fluent. Le temperature sono riportate in Kelvin.



**Figura 7. 259** Distribuzione della temperatura sul piano di mezzeria parallelo all'asse z per C=700 soli

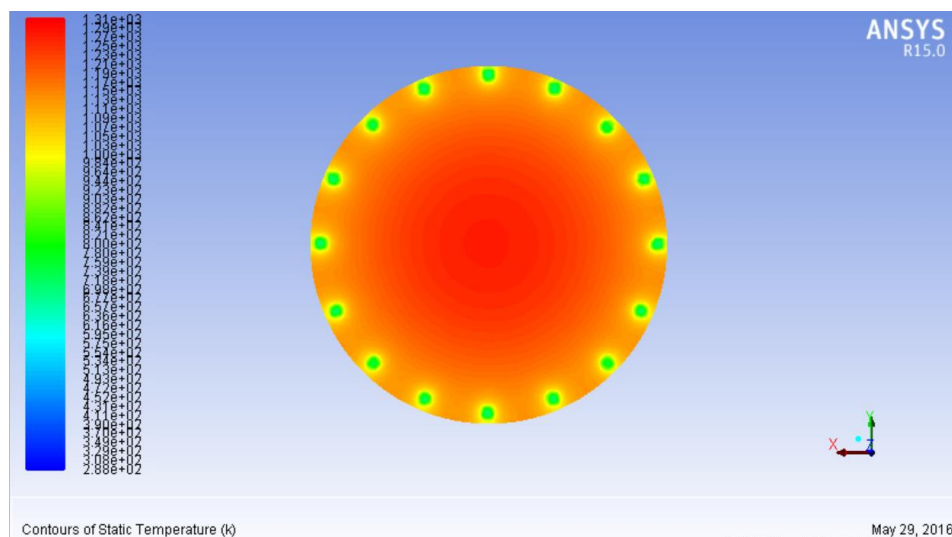


**Figura 7. 260** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato finestra per C=700 soli

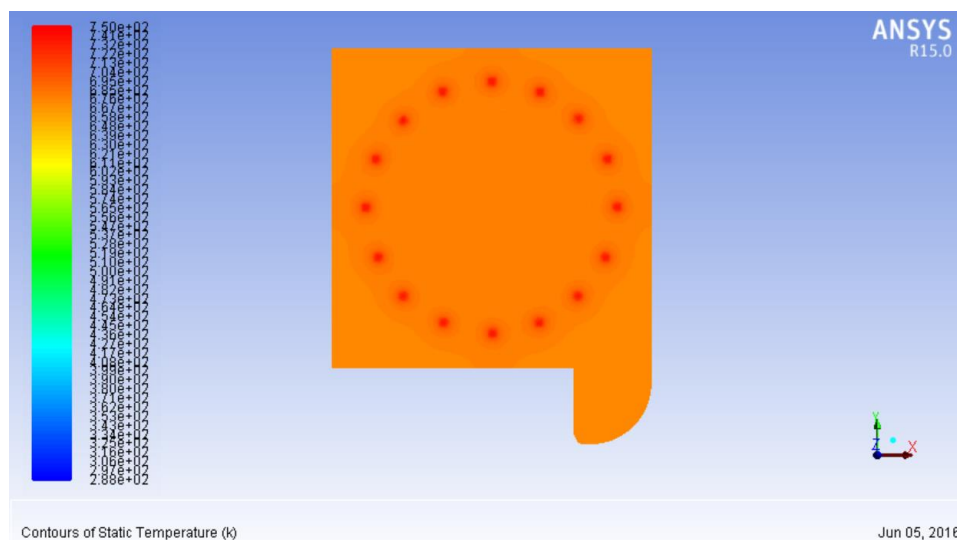
In Figura 7. 259 si ritrova l'andamento delle temperature ottenuto con il programma Steady State, ciò dimostra che il vuoto è stato simulato nel modo corretto.

L'andamento della temperatura nell'assorbitore, Figura 7. 260 e Figura 7. 261, segue quello ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima, pari a 1039 °C, è inferiore.

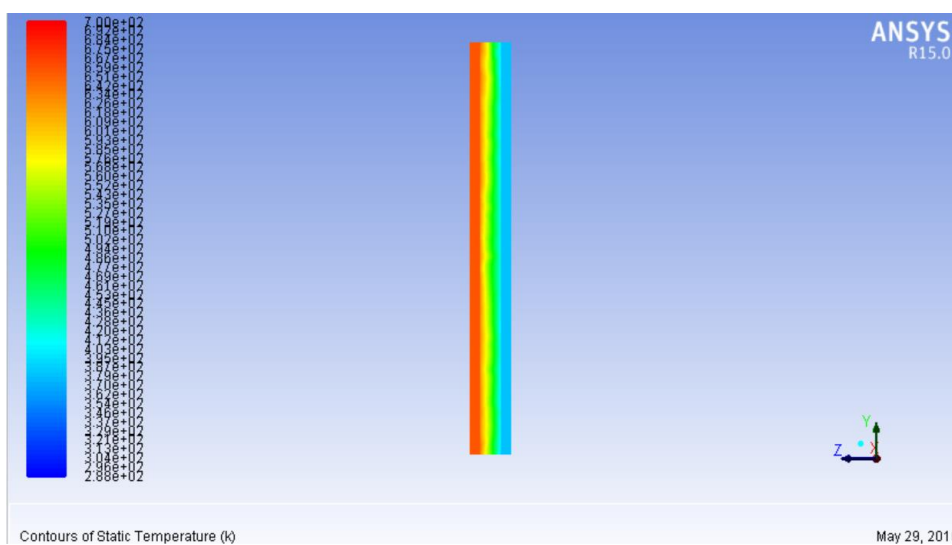
La temperatura minima è ottenuta nella zona di contatto con l'anello distanziatore ed è pari a 432°C.



**Figura 7. 261** Distribuzione della temperatura nell'assorbitore-emettitore lato collettore per C=700 soli



**Figura 7. 262** Distribuzione della temperatura nel collettore lato assorbitore per C=700 soli

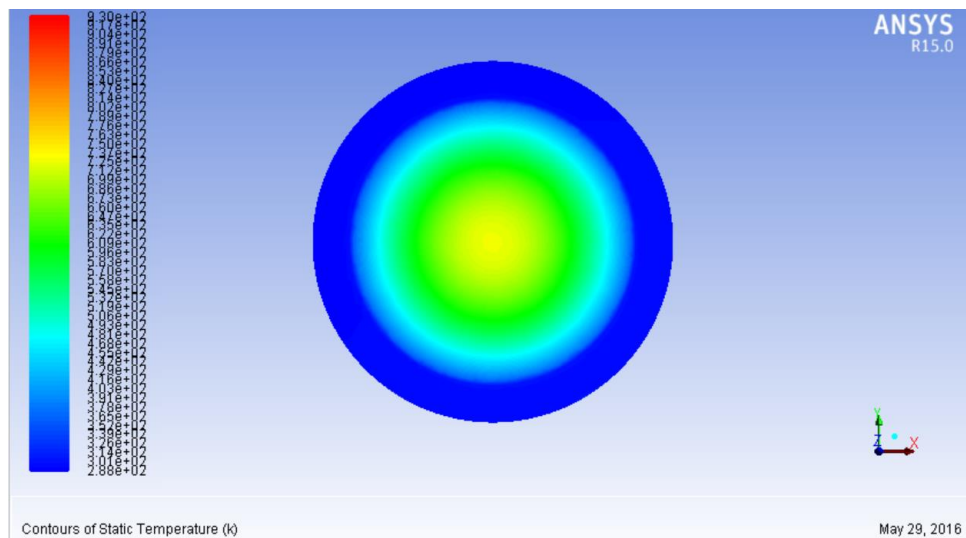


**Figura 7. 263** Distribuzione temperatura nel modulo termoelettrico per C=700 soli

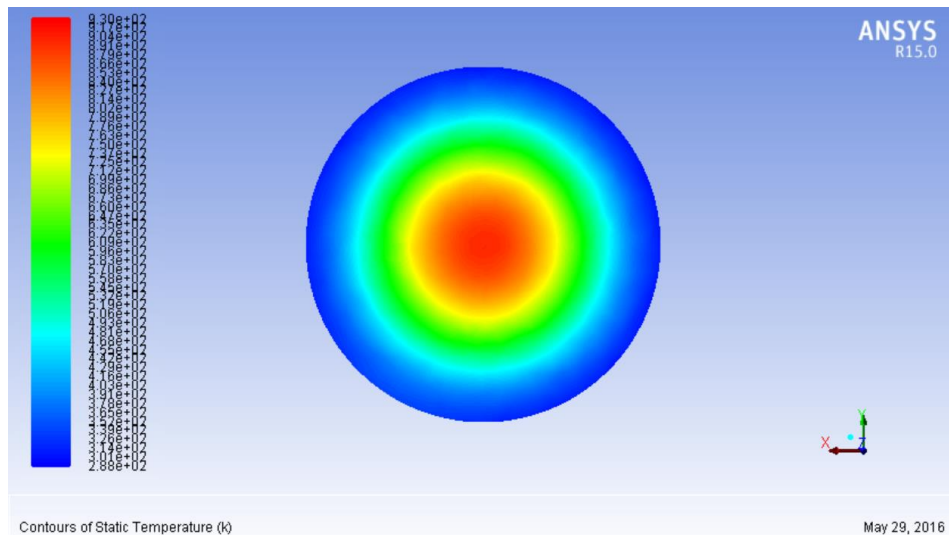
Il collettore, Figura 7. 262, presenta una zona più calda nella zona di contatto con il distanziatore. La temperatura massima raggiunta è pari a 413 °C. Sul lato di interfaccia con il modulo termoelettrico la temperatura si mantiene più omogenea e pari a circa 397 °C.

In Figura 7. 263 si può vedere l'andamento della temperatura nel modulo termoelettrico. Il lato caldo del modulo si porta ad una temperatura di 387 °C mentre il lato freddo 116 °C. Le temperature raggiunte sono inferiori rispetto al quelle in Steady State non solo per la presenza di acqua, ma anche per l'imposizione di un flusso di potenza uscente pari al 5% di quella entrante nel modulo.

La temperatura nella finestra, Figura 7. 264 e Figura 7. 265, rispetta l'andamento ottenuto con Steady State, ma la temperatura massima raggiunta è inferiore ed è pari a circa 640°C.



**Figura 7. 264** Distribuzione della temperatura nella finestra lato esterno per C=700 soli



**Figura 7. 265** Distribuzione della temperatura nella finestra lato interno per C=700 soli

Di seguito riportiamo i valori relativi alle potenze scambiate nell'assorbitore-emettitore, nel collettore, nel modulo termoelettrico e nella finestra.

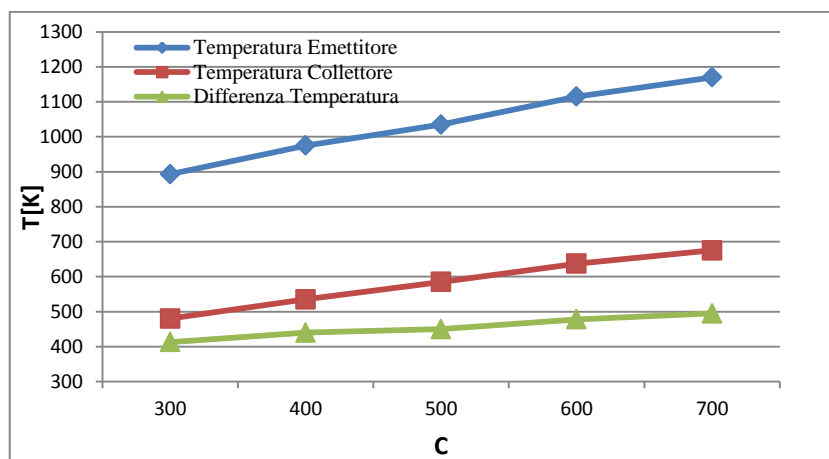
Nell'assorbitore la potenza entrante è pari a 572 W. La potenza scambiata per irraggiamento è pari a 65 W, di cui 6 W sono scambiati nella cavità delimitata dall'anello distanziatore e della restante potenza circa 56 W vengono scambiati con la finestra. La

potenza relativa al flusso termoionico è pari a 245 W, tale valore comprende la potenza prodotta e il tasso di raffreddamento. La potenza scambiata per conduzione con la ghiera di supporto o l'anello distanziatore è pari a 262 W.

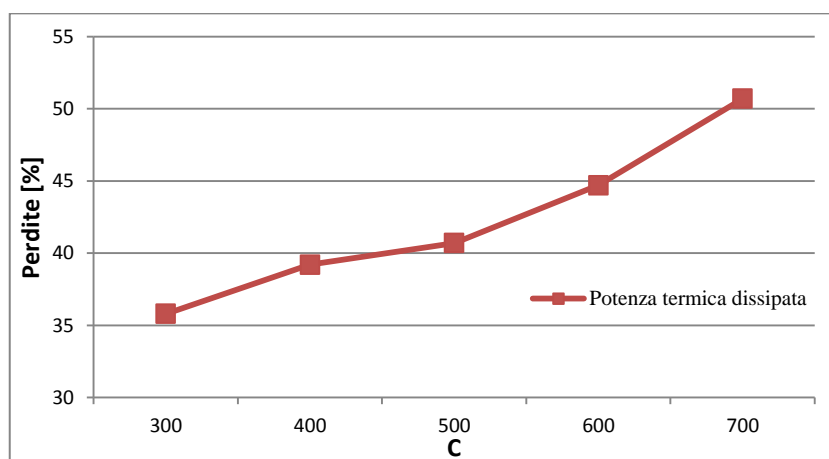
Nel collettore la potenza entrante è pari a 282,53 W di cui 143,65 W sono scambiati per conduzione e 5,88 W per irraggiamento e 133 W corrispondono al tasso di raffreddamento. La potenza uscente si suddivide in 61,4 W scambiati per conduzione con la Flangia di supporto per la finestra, 0,31 W scambiati per irraggiamento con la cavità interna al dispositivo e i restanti 220,82 W sono scambiati per conduzione con il lato caldo del modulo termoelettrico.

La potenza entrante nel modulo termoelettrico è pari a 220,82 W. La potenza prodotta è stata calcolata come il 5% di quella entrante ed è pari 11,5 W. La potenza uscente scambiata per irraggiamento con la cavità è pari a 0,53 W. la restante potenza, 208,79 W, è asportata dal corpo di flangia e in parte ceduta all'acqua fluente.

Per quanto riguarda la finestra la potenza entrante per irraggiamento è pari a 57,3 W, di cui 29,78 W vengono scambiati con il dissipatore, 17,18 W per conduzione con la flangia e 10,34 per convezione con l'esterno.



**Figura 7. 266** Andamenti delle temperature e differenza di temperatura nel modulo termoionico



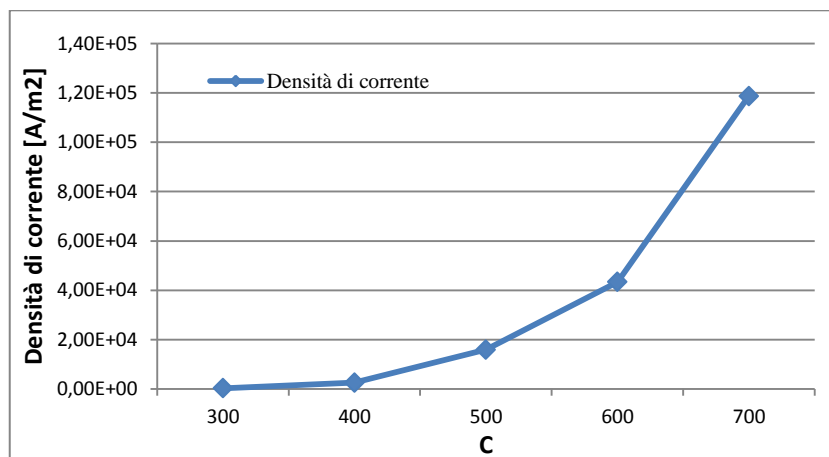
**Figura 7. 267** Andamenti della potenza scambiata dall'emettitore con ghiera, finestra e flangia.

In Figura 7. 266 si riportano gli andamenti della temperatura media delle superfici attive degli elettrodi. Come si può notare sia le temperature che la loro differenza aumentano con potenza entrante poiché cresce la percentuale di potenza termica che l'emettitore disperde

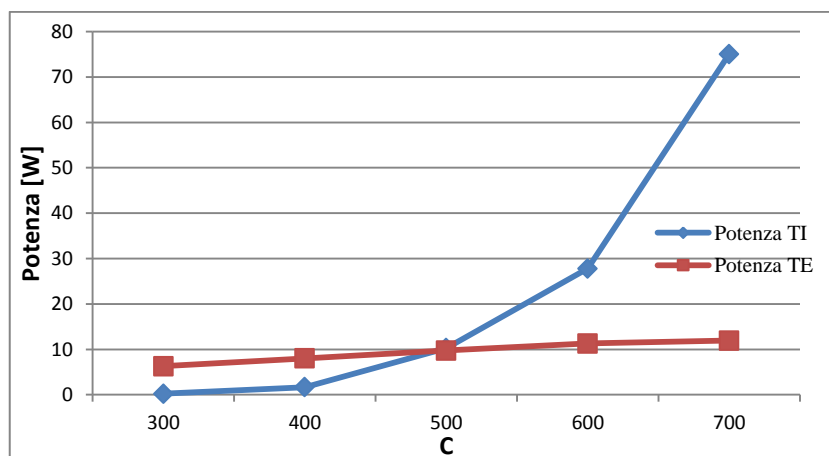


con finestra, ghiera di sostegno, flangia di supporto per la finestra e corpo di flangia, Figura 7. 267. Quindi all'aumentare di tale valore si ha il duplice vantaggio di un aumento della temperatura dell'emettitore e della differenza di temperatura tra emettitore e collettore.

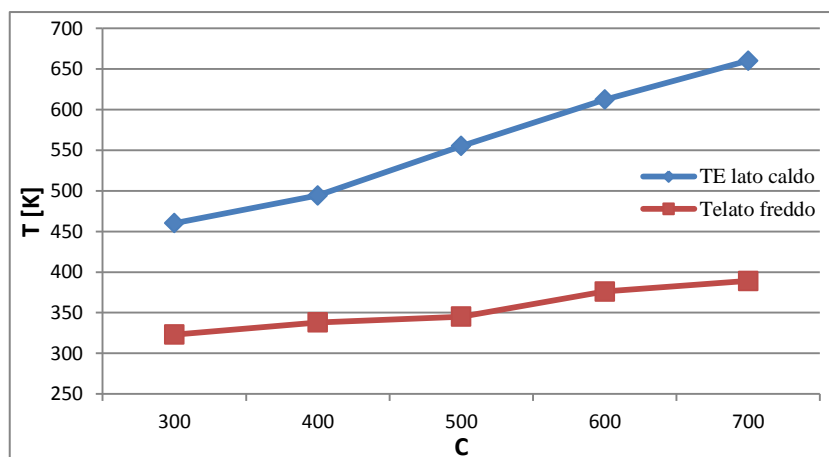
In Figura 7. 268 si riportano i valori della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione. Come si può notare l'andamento è esponenziale all'aumentare della radiazione entrante. Questo dipende sia dall'aumento della temperatura dell'emettitore sia dall'aumento dalla differenza di temperatura tra i due elettrodi.



**Figura 7. 268** Andamento della densità di corrente al variare del fattore di concentrazione della radiazione



**Figura 7. 269** Andamento della potenza prodotta dal modulo termionico e termoelettrico al variare del fattore di concentrazione della radiazione



**Figura 7. 270** Andamento temperature nel modulo termoelettrico

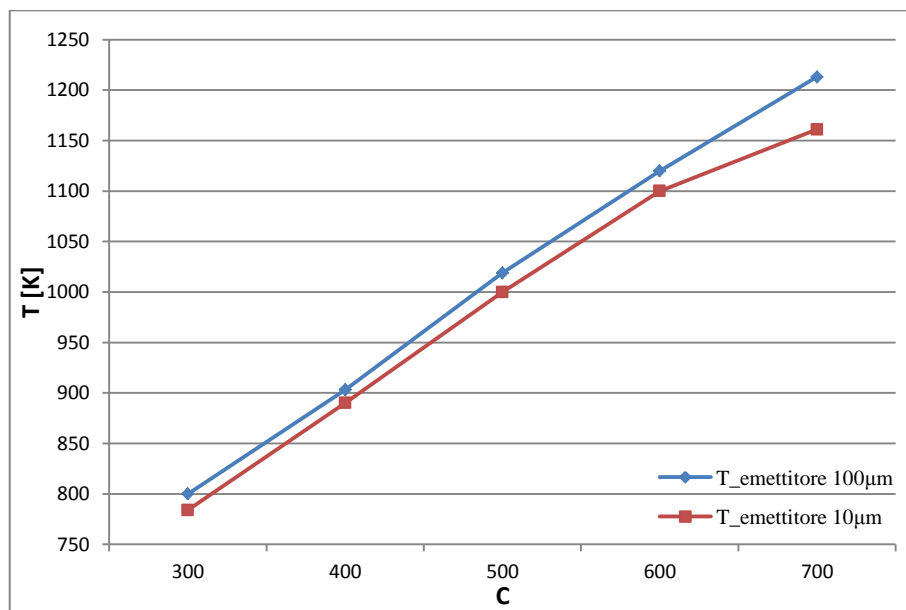
In Figura 7. 269 si riportano le temperature medie del lato caldo e del lato freddo del modulo termoelettrico per i diversi fattori di concentrazione e la potenza prodotta dal modulo. Anche in questo caso le temperature aumentano all'aumentare della radiazione entrante poiché come si è visto dall'analisi delle potenze aumenta la potenza entrante nel modulo e questo comporta anche un aumento della potenza prodotta dal modulo calcolata come il 5% della potenza termica entrante.

Dalla Figura 7. 269 è evidente come per i più bassi fattori di concentrazione della radiazione il modulo termoelettrico sia il principale componente di produzione, e che è conveniente mantenersi a fattori di concentrazione superiori a 500 soli.

## 7.5 Confronto tra casi

In questa sezione si confrontano i risultati ottenuti nei quattro casi analizzati in modo tale da determinare la soluzione più indicata per ottenere le prestazioni migliori.

Si inizia dal confrontare il caso con distanziatore a forma di anello da 100  $\mu\text{m}$  e quello con distanziatore ad anello da 10  $\mu\text{m}$ . La principale differenza tra questi due casi sta nel fatto che nel primo gli effetti di carica spaziale sono tali da ridurre notevolmente le prestazioni del modulo termoelettrico. Di seguito (Figura 7. 271 e Figura 7. 272) si riportano gli andamenti delle temperature medie nei due moduli termoelettrici.

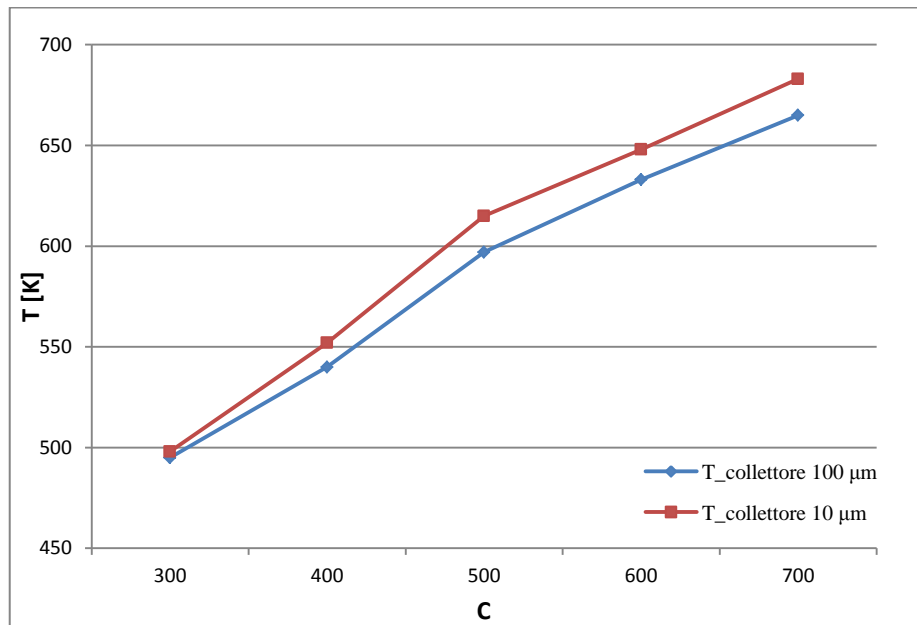


**Figura 7. 271** Confronto tra temperature medie della superficie emettente casi con anello da 100 $\mu\text{m}$  e 10 $\mu\text{m}$

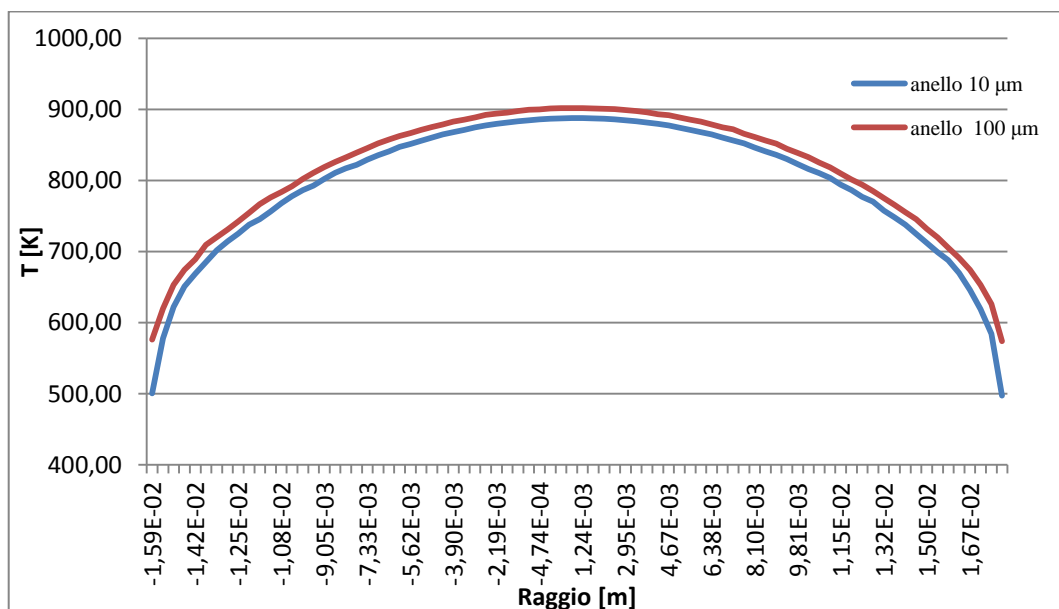
Come si può notare la temperatura media della superficie attiva dell'emettitore con distanziatore da 10  $\mu\text{m}$  si mantiene sempre inferiore rispetto al caso da 100  $\mu\text{m}$ . Per fattori di concentrazione tra 300 e 400 soli questo accade perché la potenza termica dispersa attraverso il distanziatore è maggiore nel caso da 10  $\mu\text{m}$  e questo determina un abbassamento maggiore della temperatura della superficie emettente. Per fattori di concentrazione pari a 500, 600 e 700 soli questo è principalmente dovuto alla maggiore potenza termica uscente dalla superficie legata ai flussi elettronici. Per evidenziare questa diversa distribuzione delle potenze termiche si riportano in Figura 7. 273, Figura 7. 274, Figura 7. 275, Figura 7. 276 e Figura 7. 277 gli andamenti della temperatura sulla superficie emittente.



Come si nota all'aumentare del fattore di concentrazione il valore della temperatura massima raggiunta nel caso da 10  $\mu\text{m}$  si allontana sempre più da quello raggiunto nel caso da 100  $\mu\text{m}$  e le temperature tendono ad uniformarsi al valore medio, ciò è dovuto alla potenza termica legata ai flussi elettronici uscente dalla superficie emittente. I valori delle temperature nella zona periferica invece aumentano nel caso da 10 micrometri rispetto a quello da 100 micrometri e questo è dovuto al fatto che le perdite di potenza termica attraverso il distanziatore tendono a ridursi.



**Figura 7. 272** Confronto tra temperature medie della superficie attiva del collettore casi con anello da 100 $\mu\text{m}$  e 10 $\mu\text{m}$

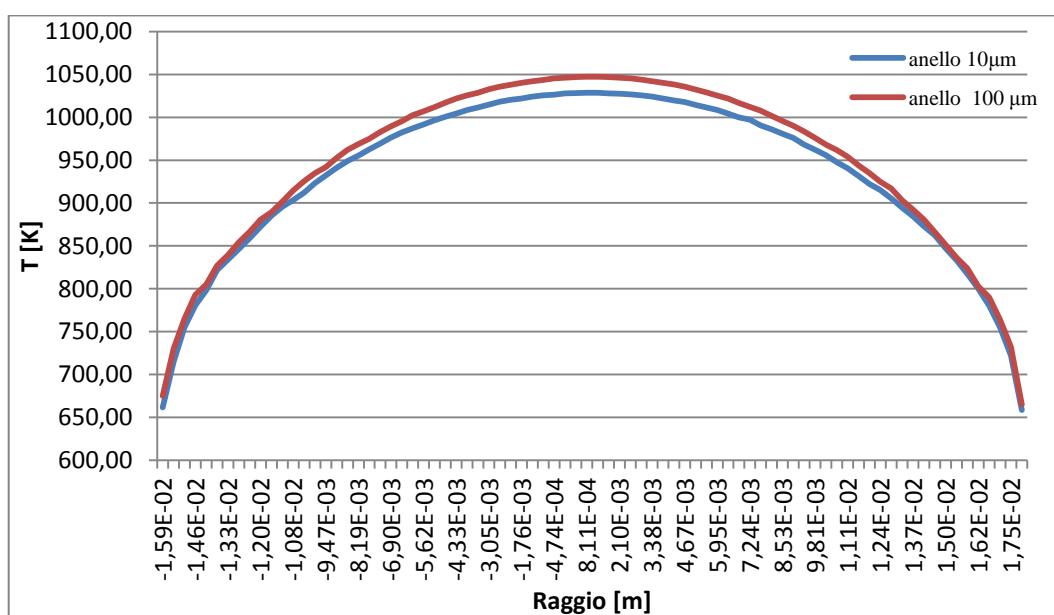


**Figura 7. 273** Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=300 soli

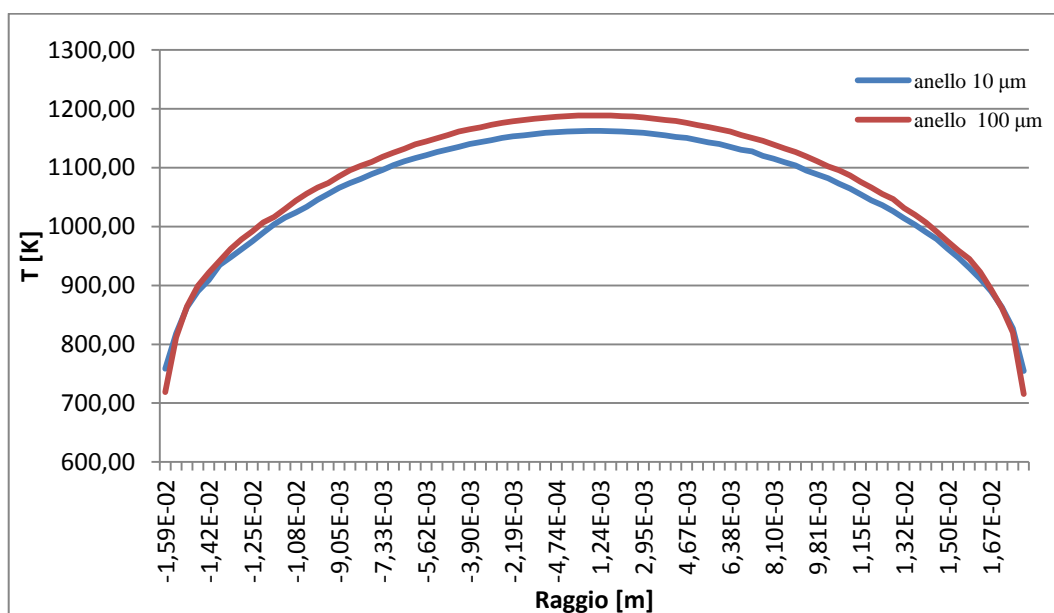
In Tabella 4 sono riportati i valori delle potenze termiche scambiate dalla superficie emittente con il distanziatore  $q_{dist}$  e quelle dovute ai flussi elettronici  $q_{el}$  nei due casi. La temperatura media della superficie attiva del collettore, Figura 7. 272, nel caso da 10 $\mu\text{m}$  si mantiene superiore rispetto a quella raggiunta nel caso da 100  $\mu\text{m}$ . Confrontando

poi le immagini relative al collettore riportate nei capitoli 7.1 e 7.2 si nota come per il caso da 10 $\mu$ m all'aumentare della radiazione entrante la temperatura sulla superficie attiva tende ad uniformarsi al valor medio mentre per 100  $\mu$ m tale fenomeno non accade. Questo è dovuto a due fattori principali:

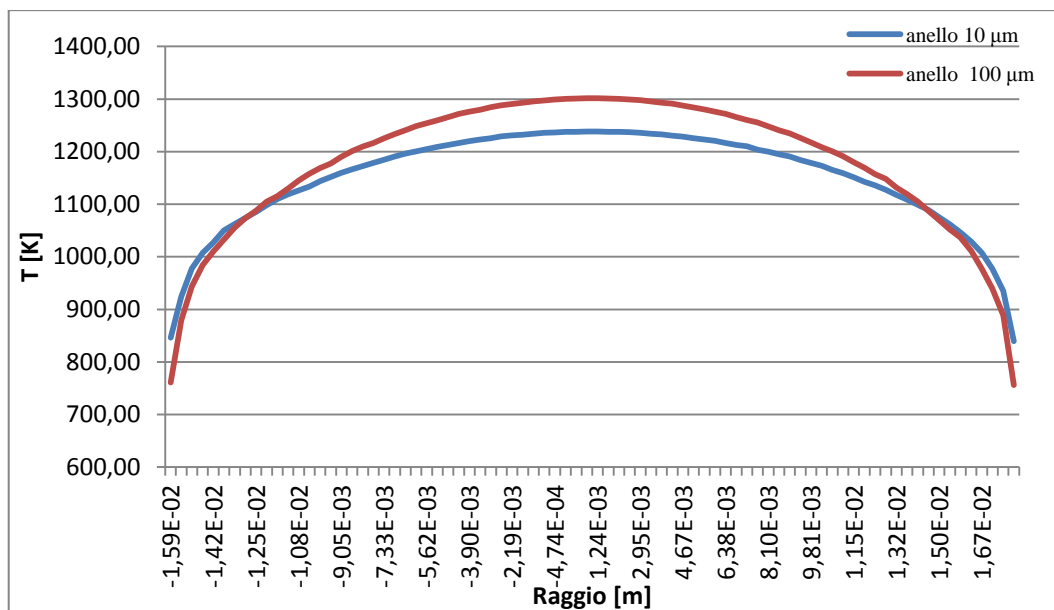
- il flusso di calore entrante nel collettore è maggiore nel caso da 10  $\mu$ m rispetto a quello da 100  $\mu$ m;
- nel primo caso il flusso entrante è costituito in parte da potenza termica scambiata con il distanziatore e in parte da potenza termica legata al flusso elettronico e potenza termica scambiata per irraggiamento che si distribuisce su tutta la superficie attiva; nel secondo caso la potenza termica entrante è essenzialmente legata allo scambio con l'anello distanziatore.



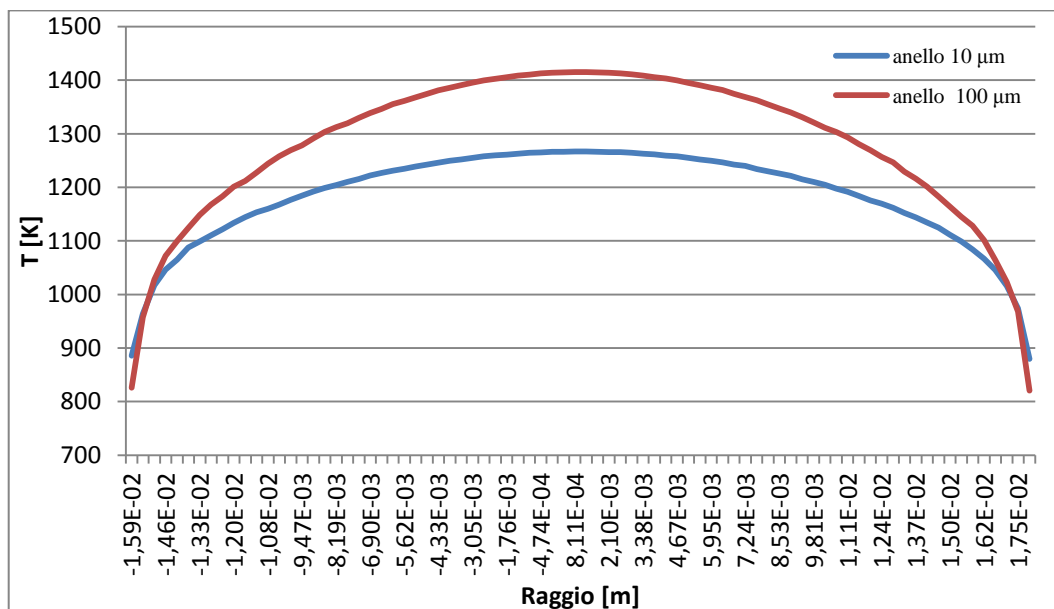
**Figura 7. 274** Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=400 soli



**Figura 7. 275** Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=500 soli



**Figura 7. 276** Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=600 soli



**Figura 7. 277** Andamento temperatura sulla superficie emettente per C=700 soli

Tabella 5 si riportano i valori delle potenze termiche entranti nel collettore, in particolare la potenza termica entrante per conduzione dal distanziatore,  $q_{dist,c}$ , e la potenza termica dovuta ai flussi elettronici,  $q_{el,c}$ .

In Figura 7. 278 e Figura 7. 279 si riportano gli andamenti delle temperature degli elementi del modulo termoionico per i casi con anello da 10μm e maschera da 10μm. Benché l'area di contatto tra distanziatori ed emettitore sia la medesima l'andamento delle temperature differisce completamente. Le temperature dell'emettitore ottenute nel caso con anello sono nettamente superiori a quelle raggiunte con maschera distanziatrice, mentre le temperature del collettore si attestano su valori inferiori. Andando ad analizzare le potenze termiche, Tabella 6, si nota che nel caso con anello i valori sono inferiori rispetto a quelli ottenuti con maschera distanziatrice.

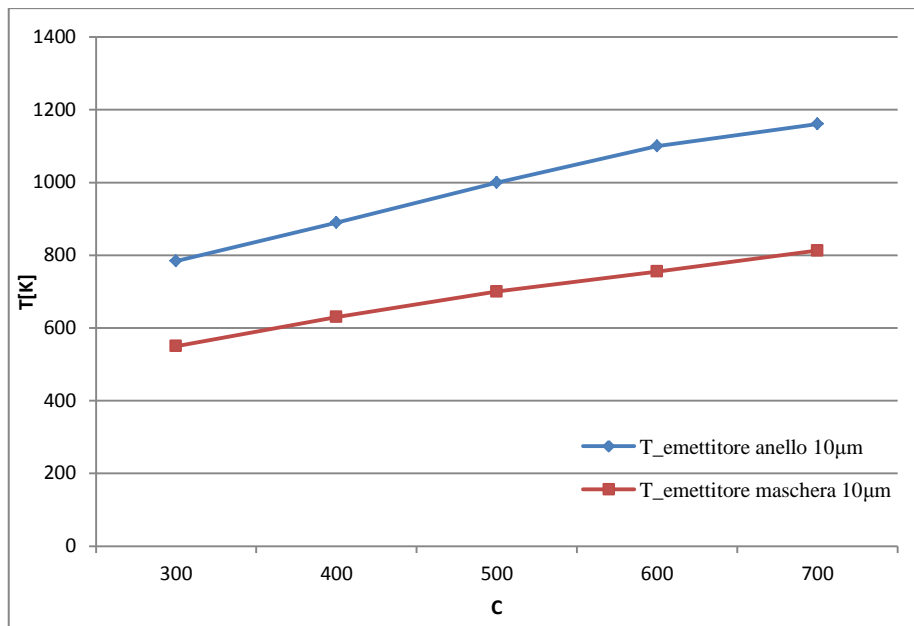
**Tabella 4** Potenze termiche dissipate dall'emettitore lato collettore per casi con anello da 100 $\mu$ m e 10 $\mu$ m

C	Anello da 100 $\mu$ m	Anello da 10 $\mu$ m
<b>300</b>	$q_{dist} = 163\text{ W}$ $q_{el} = 3,36\text{E-}12\text{ W}$ $q_{irr} = 1,1\text{ W}$	$q_{dist} = 166,4\text{ W}$ $q_{el} = 0,01\text{ W}$ $q_{irr} = 1,1\text{ W}$
<b>400</b>	$q_{dist} = 198,2\text{ W}$ $q_{el} = 5,26\text{E-}11\text{ W}$ $q_{irr} = 2\text{ W}$	$q_{dist} = 204\text{ W}$ $q_{el} = 0,11\text{ W}$ $q_{irr} = 1,9\text{ W}$
<b>500</b>	$q_{dist} = 240,8\text{ W}$ $q_{el} = 5,37\text{E-}10\text{ W}$ $q_{irr} = 3,61\text{ W}$	$q_{dist} = 235\text{ W}$ $q_{el} = 26,74\text{ W}$ $q_{irr} = 3,4\text{ W}$
<b>600</b>	$q_{dist} = 265,4\text{ W}$ $q_{el} = 1,69\text{E-}09\text{ W}$ $q_{irr} = 5,3\text{ W}$	$q_{dist} = 260,3\text{ W}$ $q_{el} = 59\text{ W}$ $q_{irr} = 4,85\text{ W}$
<b>700</b>	$q_{dist} = 269\text{ W}$ $q_{el} = 4,8\text{E-}09\text{ W}$ $q_{irr} = 7,42\text{ W}$	$q_{dist} = 191\text{ W}$ $q_{el} = 200\text{ W}$ $q_{irr} = 5,3\text{ W}$

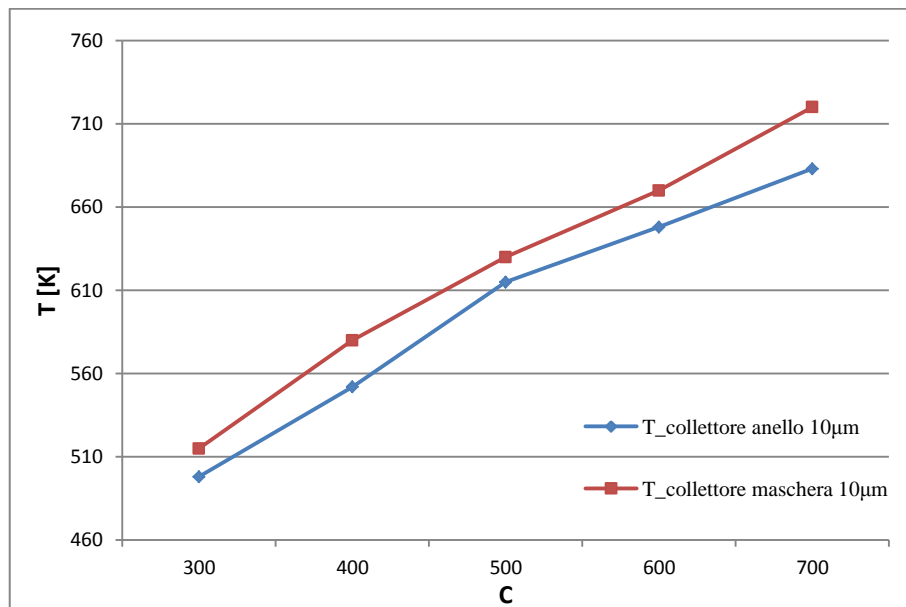
**Tabella 5** Potenze termiche entranti nel collettore, casi con anello da 100 $\mu$ m e 10 $\mu$ m

C	Anello da 100 $\mu$ m	Anello da 10 $\mu$ m
<b>300</b>	$q_{dist,c} = 163\text{ W}$ $q_{irr} = 1,09\text{ W}$	$q_{dist,c} = 166,4\text{ W}$ $q_{el,c} = 0,005\text{ W}$ $q_{irr} = 1,08\text{ W}$
<b>400</b>	$q_{dist,c} = 198,3\text{ W}$ $q_{irr} = 1,97\text{ W}$	$q_{dist,c} = 204,1\text{ W}$ $q_{el,c} = 0,05\text{ W}$ $q_{irr} = 1,8\text{ W}$
<b>500</b>	$q_{dist,c} = 241\text{ W}$ $q_{irr} = 3,57\text{ W}$	$q_{dist,c} = 235,3\text{ W}$ $q_{el,c} = 12,27\text{ W}$ $q_{irr} = 3,15\text{ W}$
<b>600</b>	$q_{dist,c} = 265,7\text{ W}$ $q_{irr} = 5,2\text{ W}$	$q_{dist,c} = 260,5\text{ W}$ $q_{el,c} = 28\text{ W}$ $q_{irr} = 4,71\text{ W}$
<b>700</b>	$q_{dist,c} = 269,8\text{ W}$ $q_{irr} = 7,39\text{ W}$	$q_{dist,c} = 191,2\text{ W}$ $q_{el,c} = 102\text{ W}$ $q_{irr} = 4,15\text{ W}$

In Figura 7. 280 e Figura 7. 281 si mettono a confronto le temperature ottenute nel modulo termoionico nei casi con anello da 10 $\mu$ m e distanziatori da 10 $\mu$ m. Come si può notare le temperature raggiunte nel caso con distanziatori sono superiori rispetto a quelle con anello. Ciò è spiegabile con il fatto che, avendo ridotto la superficie di contatto tra emettitore e distanziatori le dispersioni dovute alla conducibilità del componente si riducono. Per la medesima motivazione le temperature ottenute al collettore si portano su valori inferiori. All'aumentare della radiazione entrante si nota un avvicinamento delle temperature medie e questo è dovuto ad un avvicinamento dei valori delle potenze termiche uscenti dalla superficie. In Tabella 7 si riportano i valori delle potenze termiche uscenti dall'emettitore, in particolare potenza termica scambiata con il distanziatore,  $q_{dist}$ , e potenza dovuta a flussi elettronici,  $q_{el}$ .



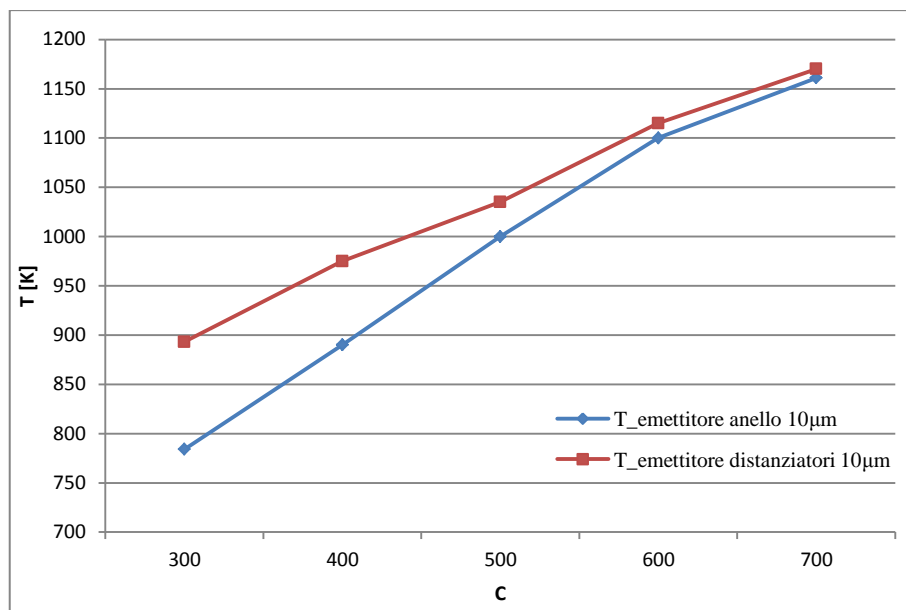
**Figura 7. 278** Confronto tra temperature medie dell'emettitore nei casi con anello e maschera da 10μm



**Figura 7. 279** Confronto tra temperature medie del collettore nei casi con anello e maschera da 10μm

**Tabella 6** Potenze termiche disperse per conduzione dall'emettitore per anello da 10μm e maschera 10μm

C	Anello da 10μm	Maschera da 10μm
300	$q_{\text{dist}} = 166,4 \text{ W}$	$q_{\text{dist}} = 172 \text{ W}$
400	$q_{\text{dist}} = 204 \text{ W}$	$q_{\text{dist}} = 224 \text{ W}$
500	$q_{\text{dist}} = 235 \text{ W}$	$q_{\text{dist}} = 291 \text{ W}$
600	$q_{\text{dist}} = 258,3 \text{ W}$	$q_{\text{dist}} = 343 \text{ W}$
700	$q_{\text{dist}} = 191 \text{ W}$	$q_{\text{dist}} = 407,8 \text{ W}$



**Figura 7. 280** Confronto tra temperature medie dell'emettitore nei casi con anello e distanziatori da 10μm

**Tabella 7** Potenze termiche uscenti dall'emettitore lato gap per anello da 10μm e 16 distanziatori 10μm

C	Distanziatori da 10μm	Anello da 10μm
300	$q_{dist} = 154,5 \text{ W}$ $q_{el} = 0,76 \text{ W}$ $q_{irr} = 2,18 \text{ W}$	$q_{dist} = 166,4 \text{ W}$ $q_{el} = 0,01 \text{ W}$ $q_{irr} = 1,1 \text{ W}$
400	$q_{dist} = 192 \text{ W}$ $q_{el} = 6,3 \text{ W}$ $q_{irr} = 3,5 \text{ W}$	$q_{dist} = 204 \text{ W}$ $q_{el} = 0,11 \text{ W}$ $q_{irr} = 1,9 \text{ W}$
500	$q_{dist} = 220,1 \text{ W}$ $q_{el} = 39 \text{ W}$ $q_{irr} = 4 \text{ W}$	$q_{dist} = 235 \text{ W}$ $q_{el} = 26,74 \text{ W}$ $q_{irr} = 3,4 \text{ W}$
600	$q_{dist} = 217 \text{ W}$ $q_{el} = 100 \text{ W}$ $q_{irr} = 4,4 \text{ W}$	$q_{dist} = 260,3 \text{ W}$ $q_{el} = 59 \text{ W}$ $q_{irr} = 4,85 \text{ W}$
700	$q_{dist} = 143 \text{ W}$ $q_{el} = 245 \text{ W}$ $q_{irr} = 5,9 \text{ W}$	$q_{dist} = 191 \text{ W}$ $q_{el} = 200 \text{ W}$ $q_{irr} = 5,3 \text{ W}$

Come si può notare dalla Tabella 7 le potenze scambiate con i distanziatori sono inferiori rispetto a quelle scambiate con l'anello, ma le potenze termiche dovute ai flussi elettronici hanno valori superiori, questo indica un miglior funzionamento della prima configurazione del modulo rispetto alla seconda.

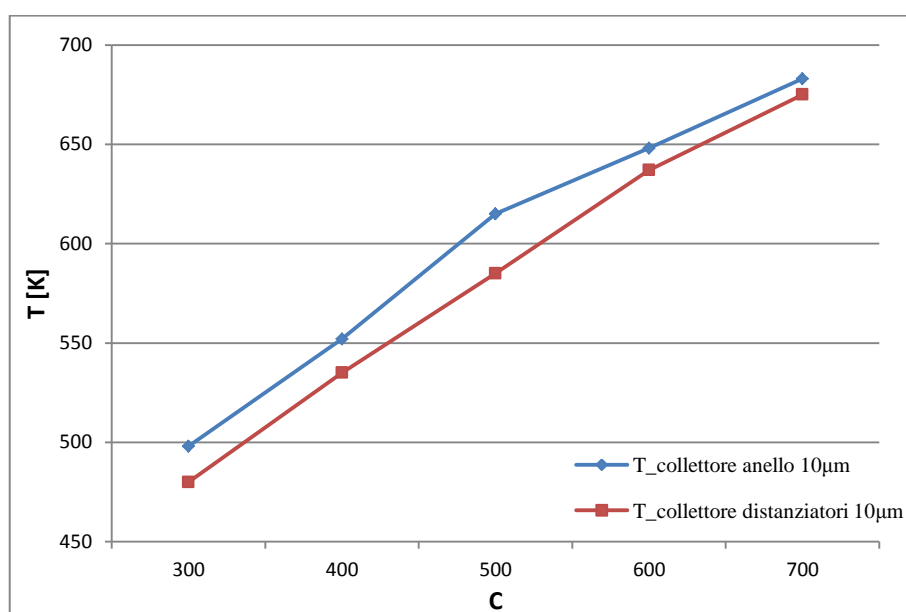
In Tabella 8 riportano le potenze termiche entranti nel collettore, in particolare potenza scambiata con il distanziatore,  $q_{dist,c}$ , e potenza dovuta ai flussi elettronici,  $q_{el,c}$ . La potenza totale entrante nel collettore per il caso con distanziatori è inferiore rispetto al caso con anello, questo spiega la minore temperatura raggiunta dalla superficie attiva.

In Figura 7. 283 è riportato l'andamento delle differenze di temperatura tra gli elettrodi del modulo termoionico nei tre casi con gap interelettrodico da 10 μm. In tutti i tre casi la differenza aumenta con il fattore di concentrazione, quindi all'aumentare della radiazione entrante si ha il duplice vantaggio dell'aumento della temperatura dell'emettitore e dell'aumento della differenza di temperatura. Dal grafico è evidente come la geometria

caratterizzata dai distanziatori a maschera non sia adatta in quanto non garantisce una differenza di temperatura adeguata.

**Tabella 8** Potenze termiche entranti nel collettore per anello da 10 $\mu$ m e 16 distanziatori 10 $\mu$ m

<b>C</b>	<b>Distanziatori da 10<math>\mu</math>m</b>	<b>Anello da 10<math>\mu</math>m</b>
<b>300</b>	$q_{\text{dist},c} = 154,8 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 0,34 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 2,18 \text{ W}$	$q_{\text{dist},c} = 166,4 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 0,005 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 1,08 \text{ W}$
<b>400</b>	$q_{\text{dist},c} = 192,4 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 2,8 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 3,14 \text{ W}$	$q_{\text{dist},c} = 204,1 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 0,05 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 1,8 \text{ W}$
<b>500</b>	$q_{\text{dist},c} = 220,5 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 17,9 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 3,56 \text{ W}$	$q_{\text{dist},c} = 235,3 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 12,27 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 3,15 \text{ W}$
<b>600</b>	$q_{\text{dist},c} = 217,6 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 49 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 4,86 \text{ W}$	$q_{\text{dist},c} = 260,5 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 28 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 4,71 \text{ W}$
<b>700</b>	$q_{\text{dist},c} = 143,4 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 133 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 5,88 \text{ W}$	$q_{\text{dist},c} = 191,2 \text{ W}$ $q_{\text{el},c} = 102 \text{ W}$ $q_{\text{irr}} = 4,15 \text{ W}$

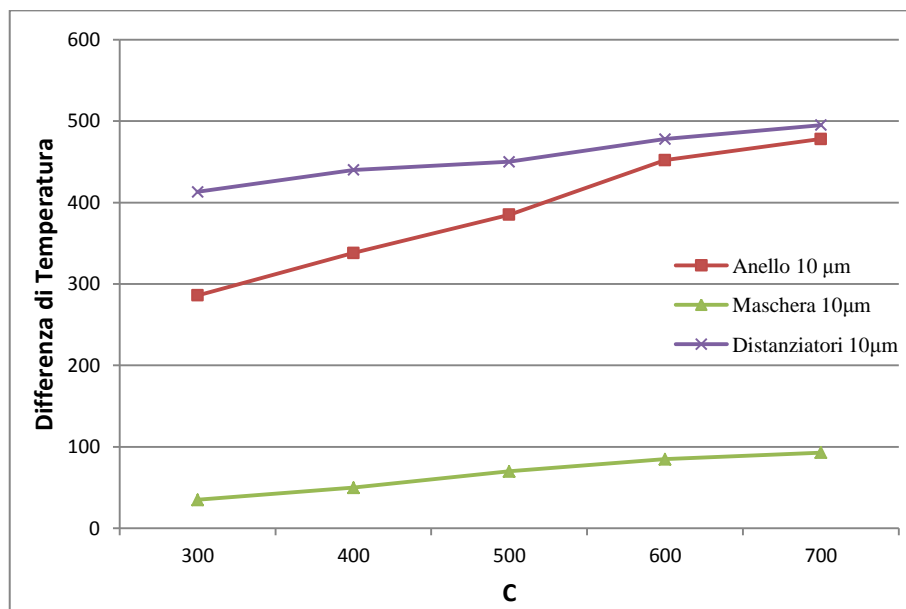


**Figura 7. 281** Confronto tra temperature medie del collettore nei casi con anello e distanziatori da 10 $\mu$ m

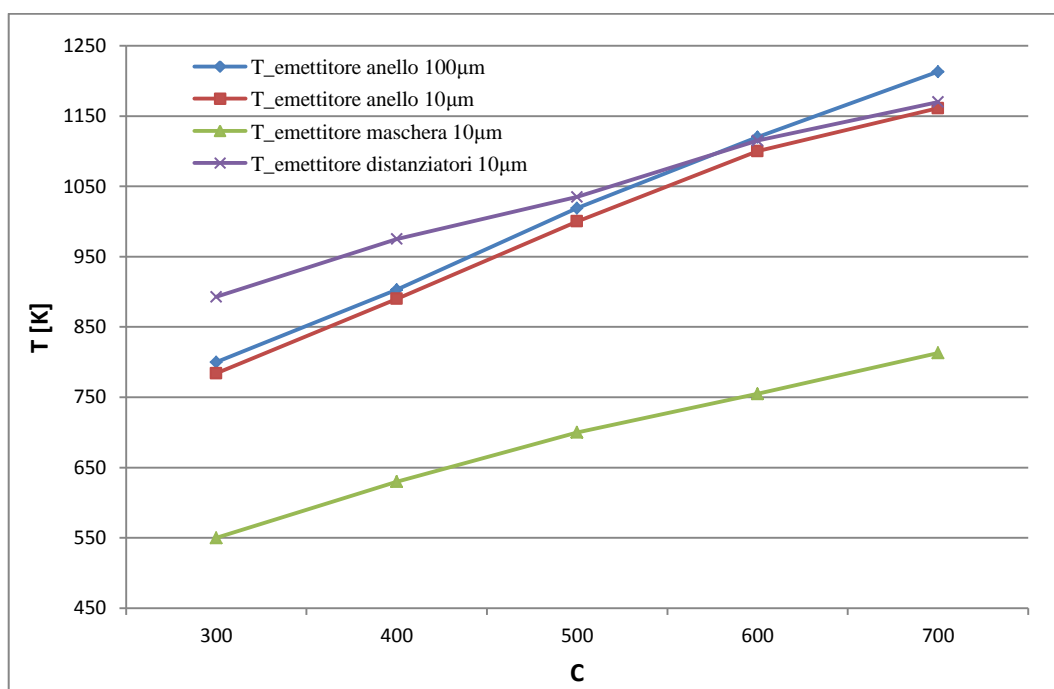
Nelle seguenti figure si confrontano i quattro casi analizzati in termini di temperature, densità di corrente e potenze elettriche prodotte.

La temperatura dell'emettitore nel caso con maschera (Figura 7. 283) si mantiene nettamente inferiore rispetto agli altri casi. Per il caso con distanziatori da 10  $\mu$ m l'emettitore si mantiene ad una temperatura superiore degli altri casi per C pari a 300, 400 e 500 soli, ma per C uguale a 600 soli viene superata da quella con anello da 100 $\mu$ m. Questo è dovuto al fatto che la potenza uscente dalla superficie emittente nella configurazione con distanziatori da 10  $\mu$ m supera quella uscente nel caso con anello da 100  $\mu$ m. Infatti benché la potenza termica dispersa attraverso il distanziatore si mantenga inferiore, la potenza legata ai flussi elettronici aumenta notevolmente.

Per quanto riguarda la temperatura del collettore, Figura 7. 284, le temperature più elevate sono raggiunte dal caso con maschera, mentre quella del caso con distanziatori si mantiene inferiore alle altre per C inferiore a 500 soli dopodiché supera la temperatura del caso con anello da 100 $\mu$ m, perché il calore entrante nel collettore diventa superiore.



**Figura 7. 282** Confronto tra differenza di temperature degli elettrodi del modulo termoionico

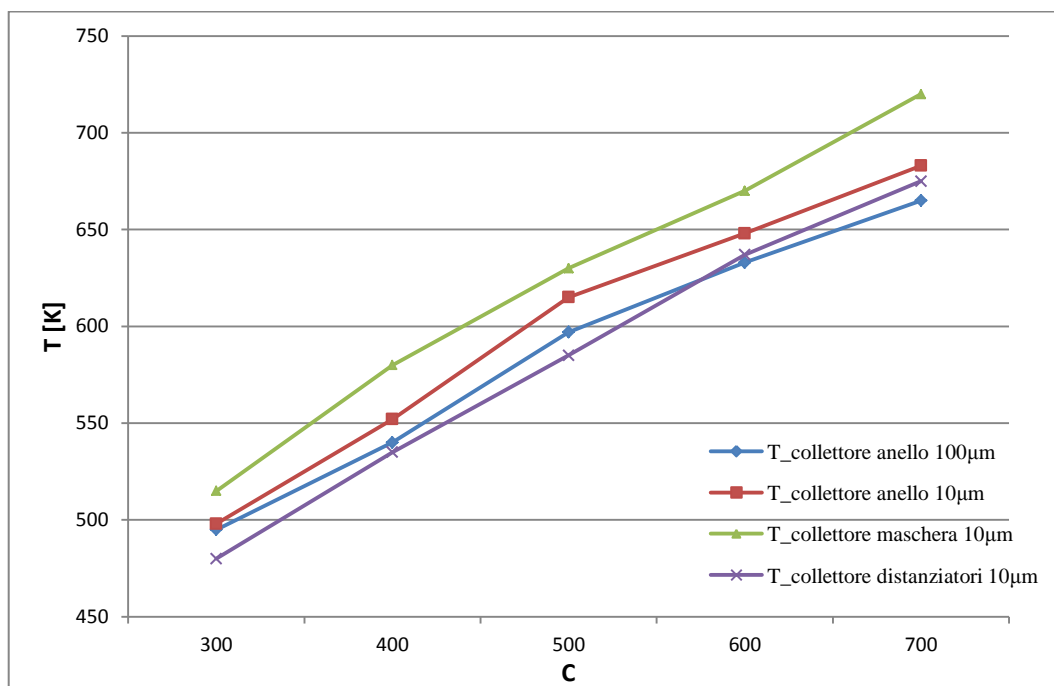


**Figura 7. 283** Confronto tra temperature medie dell'emettitore

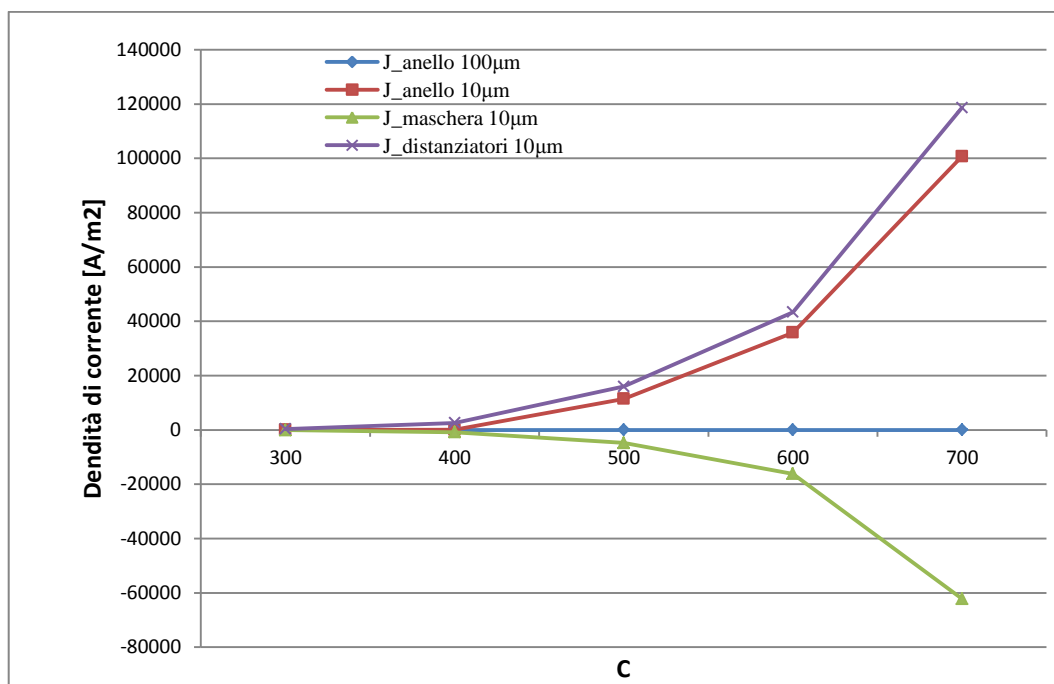
In Figura 7. 285 si mostra l'andamento delle densità di corrente con il fattore di concentrazione. Dal grafico è evidente come la presenza di effetti di carica spaziale dovuti alle dimensioni del gap riduca notevolmente le prestazioni del dispositivo, in quanto i valori di densità di corrente ottenuti nel caso con gap di 100  $\mu$ m risultano essere circa 12 ordini di grandezza inferiori rispetto agli altri casi. Per la geometria con maschera da 10



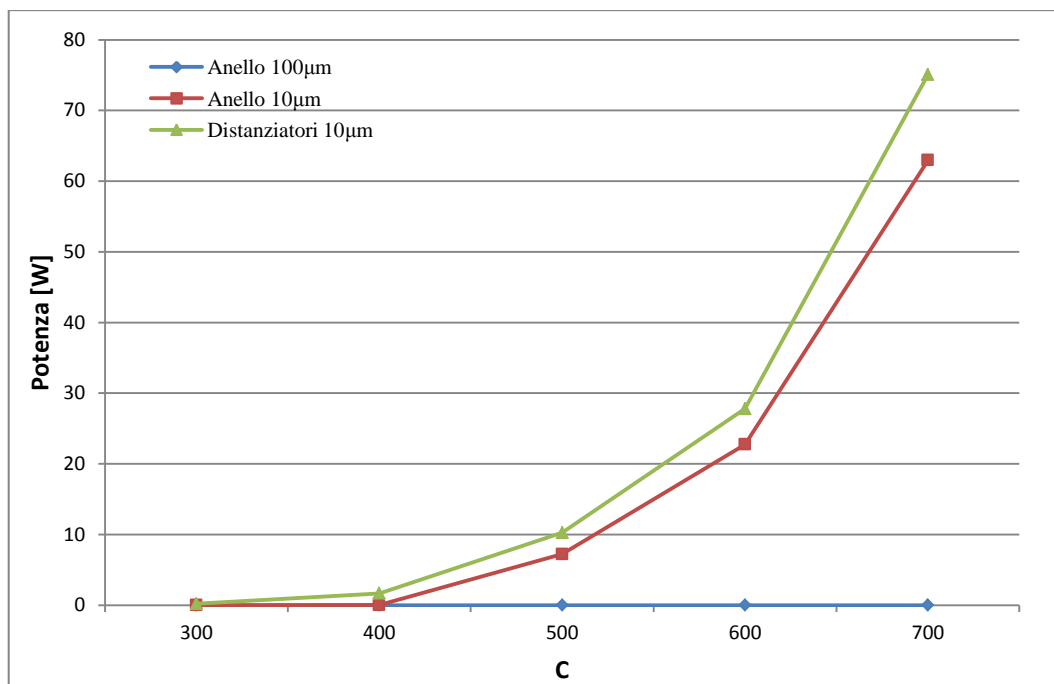
$\mu\text{m}$  si ottengono valori negativi di densità di corrente. Ciò è dovuto al fatto che la corrente elettronica riemessa dal collettore è maggiore rispetto a quella emessa dall'emettitore. I valori più elevati di densità di corrente e di conseguenza di potenza elettrica prodotta dal modulo termoionico sono ottenuti nel caso con distanziatori da  $10\text{ }\mu\text{m}$  poiché sia la temperatura dell'emettitore che la differenza di temperatura tra gli elettrodi risultano superiori. Inoltre per ottenere prestazioni accettabili risulta necessario mantenersi a fattori di concentrazione superiori a 500 soli.



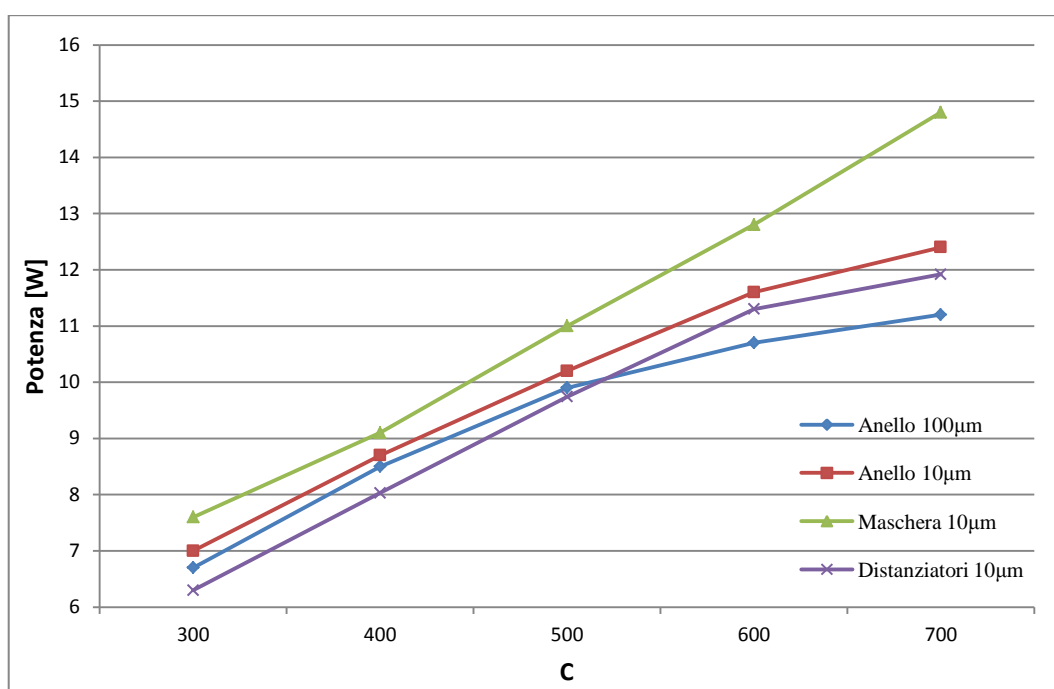
**Figura 7. 284** Confronto tra temperature medie del collettore



**Figura 7. 285** Confronto tra densità di corrente prodotte dal modulo termoionico



**Figura 7. 286** Confronto potenze elettriche prodotte dal modulo termoionico



**Figura 7. 287** Confronto potenze elettriche prodotte dal modulo termoelettrico

In Figura 7. 286 sono riportati i valori delle potenze elettriche prodotte dal modulo termoionico nelle sue diverse configurazioni. Si tralascia di riportare i valori relativi al caso con maschera perché negativi e quindi mancano di significato fisico. La potenza segue l'andamento della densità di corrente, quindi le considerazioni fatte per la densità di corrente valgono anche in questo caso.

In Figura 7. 287 si riportano gli andamenti delle potenze elettriche prodotte dal modulo termoelettrico. Tali potenze sono state calcolate come il 5% della potenza termica entrante nel modulo. I valori maggiori sono quelli ottenuti nel caso con maschera da 10μm, in quanto in tale caso le potenze termiche entranti nel modulo sono le più elevate. È altresì

vero che le temperature raggiunte dal lato caldo del modulo termoelettrico sono eccessive, quindi si riconferma l'inadeguatezza di tale geometria.

Dal confronto tra i casi si può quindi affermare che la geometria migliore è quella caratterizzata dai 16 distanziatori di spessore pari a  $10\text{ }\mu\text{m}$  in quanto garantisce le massime temperature dell'emettitore e le massime differenze di temperatura. Sono da evitare invece le geometrie con distanziatori uniformemente distribuiti sulla superficie degli elettrodi.

## Capitolo 8: Conclusioni

Nello studio realizzato, si è condotta un'analisi termica del dispositivo di conversione termoionica e termoelettrica della radiazione solare concentrata, realizzato dall'Istituto di Struttura della Materia (ISM) del CNR, operante sotto differenti condizioni di radiazione entrante.

Nella prima fase è stata condotta un'analisi bibliografica finalizzata a una maggiore comprensione dei fenomeni critici che riducono le prestazioni del dispositivo, in particolare gli effetti di carica spaziale. Un componente di fondamentale importanza, in grado di ridurre tali effetti, è il distanziatore interelettrodico.

Quattro geometrie di distanziatori, differenti in spessore e forma, sono state studiate per valutare il comportamento del dispositivo in termini di temperature, flussi termici ed elettronici e densità di corrente.

Per tale analisi è stato necessario realizzare un modello CAD del dispositivo e sfruttare il software ANSYS 15.0 per condurre simulazioni del convertitore in diverse condizioni di flusso termico entrante.

Si è condotta un'analisi preliminare con il programma Steady State Thermal del pacchetto Ansys i cui risultati sono stati utilizzati per inizializzare la successiva analisi su Fluent che tiene conto del raffreddamento ad acqua del dispositivo.

È stata condotta una analisi preliminare di sensibilità della mesh per garantire che i risultati ottenuti fossero indipendenti dal tipo di mesh utilizzata.

Poiché il dispositivo opera in condizioni di vuoto spinto, per poter simulare il suo comportamento su Fluent si è reso necessario creare un materiale dalle scarse proprietà conduttive e capacitive, imponendo valori fissi di temperatura e nulli di velocità, energia cinetica turbolenta e di tasso di dissipazione turbolenta.

Poiché durante il funzionamento, parte del calore viene convertito in potenza elettrica e in flussi elettronici che sono funzione della temperatura, la soluzione è stata raggiunta tramite un processo iterativo.

Dal confronto tra i risultati ottenuti con Steady State e Fluent e dall'analisi delle potenze termiche si può affermare che il vuoto è stato simulato in maniera più che soddisfacente.

Inoltre dall'analisi degli andamenti di temperature e potenze prodotte si può affermare che la geometria che garantisce le prestazioni più elevate è quella che presenta 16 distanziatori posizionati nella zona periferica dell'emettitore. Tale geometria infatti garantisce la massima temperatura dell'emettitore e la massima differenza di temperatura tra gli elettrodi, parametri fondamentali per un'adeguata conversione termoionica. La geometria che invece risulta essere la peggiore è quella caratterizzata dai 220 distanziatori distribuiti in modo uniforme sulla superficie dell'emettitore. In tal caso, benché la superficie di contatto sia la medesima di quella con distanziatore ad anello, la risposta in termini di temperature si discosta totalmente, non garantendo una temperatura dell'emettitore e una differenza di temperature tra gli elettrodi adeguate alla conversione termoionica.

È inoltre evidente che per ottenere adeguate prestazioni del dispositivo si rende necessario mantenersi a fattori di concentrazione superiori a 500 soli.

Il modello sviluppato è un modello semplificato in quanto considera superfici grigie e lambertiane, ma i dati ricavati sono conformi alla sperimentazione fatta in precedenza.

I risultati ottenuti possono essere un valido punto di partenza per future sperimentazioni.

## Bibliografia

- [1] John A. Duffie, and William A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition
- [2] Koeck, F.A.M., J.M. Garguilo, and R.J. Nemanich, *On the thermionic emission from nitrogen-doped diamond films with respect to energy conversion*. Diamond and Related Materials, 2004. **13**: p. 2052-55
- [3] G. N. Hatsopoulos, and E. P. Gyftopoulos, *Thermionic Energy Conversion, Volume I: Processes and Devices*
- [4] J. Mannhart, and A. Reller, *Highly-Efficient Thermoelectronic Conversion of Heat and Solar Radiation to Electric Power*, Universität Augsburg, 2012
- [5] Cyril Stephanos, *Thermoelectronic Power Generation from Solar Radiation and Heat*, 2012
- [6] Jae-Hyung Lee, Igor Bargatin, Nicholas A. Melosh, and Roger T. Howe, *Optimal emitter-collector gap for thermionic energy converters*, 2012 , Applied Physics Letters 100, 173904
- [7] Gao Min, *Thermoelectric Module Design Theories*, Cardiff University.
- [8] Alessandro Bellucci, Paolo Calvani, Emilia Cappelli, Stefano Orlando, Diletta Sciti, Ronen Yogev, Abraham Kribus, and Daniele M. Trucchi, *Preliminary Characterization of ST2G: Solar Thermionic-Thermoelectric Generator for Concentrating System*, 2014.
- [9] Daniele M. Trucchi, Emilia Cappelli, Alessandro Bellucci, Veronica Valentini, Stefano Orlando, Diletta Sciti, Laura Silvestroni, Stefano Guicciardi, Claudia Scilletta, Abraham Kribus, Maya Lifshitz, Ronen Yogev, Emre Bicer, Cem Kaypmaz, *Deliverable 3.3: Conversion Module Design Definition of Materials & Efficiency Testing*, 2012.
- [10] Paolo Calvani, Daniele M. Trucchi, and Alessandro Bellucci, *Deliverable 4.2: Conversion Module Encapsulation*, 2010.
- [11] Daniele M. Trucchi, Alessandro Bellucci, Emilia Cappelli, Paolo Calvani, Stefano Orlando, Diletta Sciti, Ronen Yogev and Abraham Kribus, *Thermionic Emission: A Different Path to Solar Thermal Electricity*.
- [12] Krainsky, I.L., et al., *Negative-electron-affinity effect on the surface of chemical-vapor-deposited diamond polycrystalline films*. Physical Review B, 1996. 53(12): p. R7650-R7653.
- [13] Nebel, C., *Surface-Conducting Diamond*, Science, 2007. 318: p. 1391-1392
- [14] Robert Siegel, and John R. Howell, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Third Edition, 1993
- [15] M. Necati Ozisik, *Heat Conduction*, Jhon Wiley & Sons, Inc, Second Edition, 1993

- [16] Daniele M. Trucchi, Emilia Cappelli, Andrea Zanza, Alessandro Bellucci, Stefano Orlando, Diletta Sciti, Alida Belloni, Laura Silvestroni, and Stefano Guicciardi, *Deliverable 3.2: Absorber Material definition, geometrical design and testing*, 2011
- [17] O. A. Sergeev, A. G. Shashkov, and A.S. Umanskii, *Thermophysical properties of quartz glass*, 1981, Plenum Publishing Corporation, Vol. 3, No. 6, pp. 960-970
- [18] J. G. Hust and P. J. Giarratano, *Thermal Conductivity and Electrical Resistivity Standard Reference Materials*, 1975, National Bureau Standards
- [19] R. W. Powell, C. Y. Ho, and P. E. Liley, *Thermal Conductivity of selected Materials*, 1966, Thermophysical Properties Research Center
- [20] H. Julian Goldsmid, *Bismuth Telluride and Its Alloys as Materials for Thermoelectric Generation*, *Materials* **2014**, 7, 2577-2592; doi:10.3390/ma7042577
- [21] Thermal Analysis Guide
- [22] Theory Reference for Mechanical APDL Mechanical Application
- [23] Ansys Fluent Theory Guide
- [24] IONVAC, *Inter-electrode spacing by thermally insulating thin film*
- [25] IONVAC, *Recipes for inter-electrode spacers fabrication on anode*
- [26] Kamarul Aizat Abdul Khalid, Thye Jien Leong, and Khairudin Mohamed, *Review on Thermionic Energy Converters*, *IEEE transactions on electron devices*, vol. 63, no. 6, june 2016
- [27] A. Shakouri, Z. Bian, R. Singh, Y. Zhang, D. Vashaee, T. E. Humphrey and H. Schmidt, *Solid-State and Vacuum Thermionic Energy Conversion*, 2005

## Ringraziamenti

*Desidero iniziare con il ringraziare coloro che hanno contribuito direttamente al completamento di questa tesi e per primi i mie relatori, il prof. Antonelli e l'ing. Trucchi, che oltre ad essere sempre stati disponibili a rispondere ad ogni mio quesito si sono dimostrati essere due persone splendide. Un ringraziamento va anche al prof. Desideri per i suoi consigli. Grazie ad Andrea ed Alessandro per la loro infinita disponibilità e per aver rinunciato ai loro computer innumerevoli volte, siete stati preziosi.*

*Un ringraziamento va a mia nonna, i miei genitori, Emanuele e la mia famiglia per il costante sostegno.*

*Ringrazio anche tutti i miei amici e tutti coloro che mi sono stati vicini in questi anni supportandomi nei momenti difficili e condividendo con me gioie e traguardi.*

*Grazie a voi Tutti.*